

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN PENGATURAN FREKUENSI DAN
TEGANGAN GENERATOR INDUKSI UNTUK PLTM
CHECK DAM V KALIJARI KABUPATEN BLITAR**

SKRIPSI

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik*



Disusun oleh :

**Alimahtus Sa'diyah
NIM. 0110630011**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN ELEKTRO
MALANG
2006**



repository.ub.ac.id

PERANCANGAN PENGATURAN FREKUENSI DAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI UNTUK PLTM CHECK DAM V KALIJARI KABUPATEN BLITAR

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

Alimahtus Sa'diyah
NIM. 0110630011

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

DOSEN PEMBIMBING :

Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE, PhD
NIP. 130 518 936

Ir. Hari Santoso, MS
NIP. 131 470 477



APLIKASI PENGENALAN UCAPAN MANUSIA DALAM KUNCI ELEKTRONIK

Disusun oleh :

VITA NURDINAWATI
NIM. 0110630125

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 27 Mei 2006

DOSEN PENGUJI

Ir. M. Julius St., MS.
NIP. 131 124 655

M. Rif'an, ST, MT.
NIP. 132 283 659

R. Arief Setyawan, ST, MT.
NIP. 132 231 713

Ir. Nurussa'adah
NIP. 131 994 339

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Purwanto, MT.
NIP. 131 574 847



repository.ub.ac.id

PERANCANGAN PENGATURAN FREKUENSI DAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI UNTUK PLTM KALIJARI KABUPATEN BLITAR

Disusun oleh:

ALIMAHTUS SA'DIYAH
NIM. 0110630011

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 22 Juli 2006

DOSEN PENGUJI

Ir. Soemarwanto
NIP. 130 873 485

Ir. Chairuzzaini
NIP. 130 682 589

Ir. Mahfudz Shidiq, MT.
NIP. 131 699 002

Ir. Unggul Wibawa, MSc.
NIP. 131 759 600

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Purwanto, MT
NIP. 131 574 847

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah swt yang telah melimpahkan anugrah, perlindungan, rahmat, kasih sayang- Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Elektro pada bidang studi Sistem Tenaga, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Dengan rasa hormat, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak Ir. Purwanto, MT sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Ir. Heri Purnomo sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE, PhD selaku dosen pembimbing I dan sebagai guru yang dengan segenap hati telah memberikan bimbingan, masukan, saran dan motivasi hingga skripsi ini selesai.
4. Bapak Ir. Hari Santoso, MS selaku dosen pembimbing II dan sebagai guru yang telah segenap hati memberikan perhatian, arahan, dorongan, saran dan masukan mulai ide dasar hingga terselesainya skripsi ini.
5. Bapak, Ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari sepenuhnya atas keterbatasan serta kekurangan yang ada pada tulisan ini, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran agar tulisan ini menjadi lebih baik.

Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan pengetahuan.

Malang, Juli 2006

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
ABSTRAK	ix
I. Pendahuluan	
1.1. Latar belakang	1
1.2. Rumusan masalah	3
1.3. Batasan masalah	3
1.4. Tujuan	3
1.5. Manfaat	4
1.6. Sistematika pembahasan	4
II. Teknologi PLTM	
2.1. Umum	5
2.2. Komponen- komponen bangunan sipil PLTM	7
2.3. Konversi energi listrik dari tenaga air	9
2.4 Turbin air untuk PLTM dan penggunaannya	11
2.4.1 Jenis turbin air pada PLTM	11
2.4.2 Penggunaan turbin	13
III. Generator Induksi	
3.1 Umum	15
3.2 Konstruksi	16
3.3 Prinsip kerja generator induksi	18
3.4 Eksitasi pada generator induksi	19
3.5 Generator induksi yang dioperasikan sendiri	20
3.5.1 Prinsip kerja	20

3.5.2 Rangkaian ekivalen generator induksi beroperasi sendiri	21
3.5.3 Kurva magnetisasi	22
3.6 Tegangan keluaran generator induksi	23
IV. Sistem Pengaturan Tegangan dan Frekuensi	
4.1 Umum	25
4.2 Tegangan dan frekuensi pada keadaan mantap	25
4.3 Pengaturan tegangan	26
4.4 Pengaturan frekuensi	29
4.5 Sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator	29
V. Metodologi Penelitian	
5.1 Umum	31
5.2 Obyek penelitian	31
5.3 Studi literatur	31
5.4 Pengumpulan data	32
5.5 Perancangan alat	32
5.6 Pengujian alat dan analisis	32
5.7 Penarikan kesimpulan	32
VI. Perancangan Sistem Pengatur Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi	
6.1 Sistem pengatur tegangan dan frekuensi	33
6.2 Perancangan sistem pengaturan frekuensi dan tegangan	36
6.2.1 Pengatur tegangan	37
6.2.1.1 Pengatur elektronik	37
6.2.1.2 Rancangan mekanik	39
6.2.2 Pengatur frekuensi	40
	41
VII. Pengujian dan Analisis	
7.1 Umum	42
7.2 Pengujian karakteristik generator induksi	42
7.2.1 Tujuan	42

7.2.2 Peralatan	42
7.2.3 Rangkaian pengujian	42
7.2.4 Prosedur pengujian	43
7.2.5 Hasil pengujian	44
7.3 Pengujian sensor putaran	44
7.3.1 Tujuan	44
7.3.2 Peralatan	45
7.3.3 Rangkaian pengujian	45
7.3.4 Prosedur pengujian	45
7.3.5 Hasil pengujian	45
7.4 Pengujian pengatur frekuensi	47
7.4.1 Tujuan	47
7.4.2 Peralatan	47
7.4.3 Prosedur pengujian	47
7.4.4 Hasil pengujian	48
7.5 Pengujian sensor tegangan	48
7.5.1 Tujuan	48
7.5.2 Peralatan	49
7.5.3 Prosedur pengujian	49
7.5.4 Hasil pengujian	49
7.6 Pengujian pengatur tegangan	49
7.6.1 Tujuan	49
7.6.2 Peralatan	50
7.6.3 Prosedur pengujian	50
7.6.4 Hasil pengujian	50
7.7 Pengujian koordinasi pengatur tegangan dan frekuensi	51
7.7.1 Tujuan	51
7.7.2 Peralatan	51
7.7.3 Prosedur pengujian	51
7.7.4 Hasil pengujian	52
VIII. Penutup	
8.1 Kesimpulan	53

8.2 Saran

54

DAFTAR PUSTAKA

55

Lampiran

57

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Perbandingan antara generator induksi dan generator sinkron	16
Tabel 7.1	Hasil pengujian karakteristik generator induksi	44
Tabel 7.2	Hasil pengujian alternator pada berbagai putaran	46
Tabel 7.3	Tegangan keluaran rangkaian penyearah dan pembagi tegangan pada pengatur frekuensi	47
Tabel 7.4	Hasil pengujian pengatur frekuensi	48
Tabel 7.5	Hasil pengujian sensor tegangan	49
Tabel 7.6	Hasil pengujian pengatur tegangan	50
Tabel 7.7	Hasil pengujian pengatur frekuensi dan tegangan.	52



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro	7
Gambar 2.2	Komponen-komponen bangunan sipil suatu PLTM	8
Gambar 2.3(a)	Turbin Pelton	11
Gambar 2.3(b)	Pengatur aliran air pada turbin Pelton	11
Gambar 2.4(a)	Turbin arus lintang (<i>cross flow</i>)	12
Gambar 2.4(b)	<i>Runner</i> turbin arus lintang	13
Gambar 2.5	Konstruksi turbin tabung	13
Gambar 2.6	Diagram Pemilihan Jenis Turbin berdasarkan <i>head</i> dan debit air	14
Gambar 2.7	Diagram Pemilihan Jenis Turbin berdasarkan <i>head</i> dan daya keluaran generator.	14
Gambar 3.1	Rotor jenis belitan	17
Gambar 3.2	Rotor sangkar (<i>Squirrel Cage Rotor</i>)	17
Gambar 3.3	Mesin induksi jenis rotor sangkar	17
Gambar 3.4	Karakteristik torsi terhadap kecepatan putaran pada mesin induksi	19
Gambar 3.5	Diagram koneksi generator induksi fasa tiga terisolasi.	20
Gambar 3.6	Model rangkaian fasa satu generator induksi beroperasi sendiri berbeban pada frekuensi standar	21
Gambar 3.7	Rangkaian ekuivalen per fasa generator induksi beroperasi sendiri tanpa beban	21
Gambar 3.8	Penentuan titik operasi generator induksi kondisi tanpa beban	23
Gambar 3.9	Rangkaian ekuivalen generator induksi penguatan sendiri yang dipengaruhi frekuensi dengan beban resistif	24
Gambar 4.1	Generator induksi beroperasi sendiri dengan konversi AC-DC-AC	27
Gambar 4.2	Tap kapasitor	27

Gambar 4.3	Pengontrol tegangan sistem elektronik dengan mengatur besar kapasitor yang terpasang.	28
Gambar 4.4	Pengatur tegangan dengan sistem beban komplemen	28
Gambar 4.5	Skema sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator	29
Gambar 4.6	Blok diagram model pengaturan frekuensi pada sistem pembangkit terisolasi	30
Gambar 4.7	Grafik respon pengatur frekuensi terhadap perubahan beban	30
Gambar 6.1	Diagram alir koordinasi pengaturan frekuensi dan tegangan	35
Gambar 6.2	Sistem pengatur tegangan dan frekuensi generator induksi beroperasi sendiri	36
Gambar 6.3	Skematik rangkaian pengatur tegangan	37
Gambar 6.4	Rangkaian <i>window detector</i>	38
Gambar 6.5	Susunan posisi kapasitor tanpa beban (C) dan tap kapasitor (C ₁ , C ₂ , C ₃ dan C ₄)	39
Gambar 6.6(a)	Susunan penggerak posisi tap kapasitor	39
Gambar 6.6(b)	Tampak atas posisi lubang untuk tempat tuas pada pipa <i>non konduktif</i>	40
Gambar 6.6(c)	Tuas penghubung ujung kapasitor	40
Gambar 6.7	Pemasangan <i>exciter</i> pada generator induksi yang beroperasi sendiri	40
Gambar 6.8	Skematik rangkaian pengatur tegangan	41
Gambar 7.1	Rangkaian pengujian karakteristik generator induksi	43
Gambar 7.2 (a)	PMG atau alternator	45
Gambar 7.2 (b)	Letak <i>pulley alternator</i>	45
Gambar 7.3	Grafik tegangan keluaran alternator sebagai fungsi putaran	46



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Komponen Rangkaian Pengatur Tegangan	57
Lampiran 2	Komponen Rangkaian Pengatur Frekuensi	61
Lampiran 3	Merek dan tipe peralatan untuk pengujian	62
Lampiran 4	Foto objek pengujian	63
Lampiran 5	Rangkaian pengatur frekuensi	68
Lampiran 6	Rangkaian pengatur tegangan	69
Lampiran 7	Rangkaian pengujian alat sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator induksi	70
Lampiran 8	Data Sheet	71



ABSTRAK

ALIMAHTUS SA'DIYAH, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2006, *Pengaturan Frekuensi dan Tegangan Generator Induksi pada PLTM Check Dam V Kalijari Kabupaten Blitar*, Dosen Pembimbing: Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE, PhD dan Ir. Hari Santoso, M.S.

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) adalah pembangkit listrik berukuran kecil yang memanfaatkan air sebagai tenaga penggerak turbin dengan daya yang dibangkitkan kurang dari 200 kW. PLTM yang diteliti direncanakan menggunakan generator induksi beroperasi sendiri, yaitu tanpa terhubung dengan jala-jala. Pada oprasi ini, generator membutuhkan daya reaktif melalui penguatan kapasitif agar dapat membangkitkan tegangan.

Fluktuasi beban listrik dan perubahan-perubahan daya di sisi beban yang disuplai oleh generator berpengaruh pada frekuensi dan tegangan terminal generator. Agar frekuensi dan tegangan konstan atau jika mengalami variasi yang masih berada pada kawasan yang diijinkan sesuai standar PLN, diperlukan pengaturan frekuensi dan tegangan..

Pengaturan frekuensi dan tegangan pada penelitian ini menggunakan rangkaian elektronik yang mengendalikan motor servo. Pengaturan frekuensi dilakukan dengan mengendalikan motor servo penggerak *guide* vane. Pengaturan tegangan dilakukan dengan mengendalikan motor servo penggerak *tap* kapasitor. Pengaturan frekuensi dan tegangan saling dikoordinasikan satu sama lain dengan tujuan agar pengatur frekuensi bekerja lebih dulu dibandingkan pengatur tegangan.



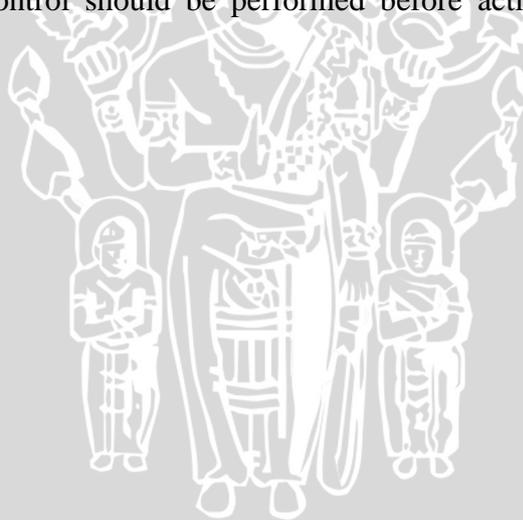
ABSTRACT

ALIMAHTUS SA'DIYAH, Electrical Engineering of Brawijaya University, July 2006, *Frequency and Voltage Control of Induction Generator in PLTM Check Dam V Kalijari Kabupaten Blitar*, Lecturer Counselor : Prof.Ir. Budiono Mismail, MSEE, Phd and Ir. Hari Santoso, M.S

Microhydro electric power plant is a small hydro electric power plant generates power less than 200 kW. Microhydro electric power plant in this study uses a stand-alone induction generator. Reactive power required is supplied by capacitor connected in parallel with the induction generator.

Fluctuations of the loads affect the generated frequency and voltage. Frequency and voltage have to be remaining constant within the permitted range set by PLN (*Perusahaan Listrik Negara*).

Control systems in this study use electronic devices to drive servo motor. Frequency control is performed by setting the guide vane activated by the servo motor. Voltage control is done by moving tap that controls the excitation capacitance. Good coordination of the frequency and voltage controls is required; therefore frequency control should be performed before activating the voltage control.



BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) adalah pembangkit listrik berukuran kecil yang memanfaatkan air sebagai tenaga penggerak turbin. Sumber tenaga berupa air dengan tinggi jatuh yang tidak terlalu tinggi. Kapasitas daya yang dibangkitkan oleh PLTM biasanya kurang dari 200 kW (Subekti, 1997).

PLTM merupakan teknologi alternatif serba guna yang dibangun di daerah-daerah yang belum terpasang jaringan listrik dari PLN. Tujuan dilaksanakannya pembangunan pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah untuk menunjang program pelistrikan desa. Diharapkan dengan adanya jaringan listrik yang disuplai dari pembangkit ini akan terjadi peningkatan taraf ekonomi dan sosial masyarakat daerah terpencil.

Generator sinkron telah banyak dipakai dalam sistem pembangkitan listrik tenaga mikrohidro. Pertimbangan untuk memakai generator induksi (asinkron) dalam sistem PLTM karena beberapa kelebihan yang dimiliki jika dibandingkan dengan generator sinkron, antara lain instalasinya sederhana dengan biaya yang murah, sifatnya yang kokoh, serta mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Dengan berbagai pertimbangan tersebut, generator induksi cocok dipakai di pedesaan yang tingkat keahlian dan kemampuan operator dalam pemeliharaan peralatan masih kurang (Mismail, 1989).

PLTM dibangun di daerah yang terpencil dan belum terjangkau oleh jala-jala PLN. Hal ini menyebabkan generator induksi dioperasikan secara terisolasi, yaitu tanpa terhubung dengan jala-jala. Daya reaktif yang dibutuhkan untuk menjalankan generator induksi tidak lagi disuplai dari sistem jala-jala, sehingga harus diperoleh melalui penguatan kapasitif. Penguatan kapasitif ini dapat diperoleh dari kapasitor statik yang dihubungkan secara paralel dengan generator induksi.

Turbin sebagai penggerak mula yang dikopel dengan rotor generator sering mengalami perubahan kecepatan putaran, sehingga berakibat tidak konstan

putaran rotor generator. Hal ini menyebabkan adanya variasi tegangan dan frekuensi listrik yang keluar dari terminal generator.

Energi listrik di pedesaan lebih banyak dimanfaatkan sebagai penerangan pada malam hari. Sementara itu, penggunaan listrik di siang hari jumlahnya relatif sedikit. Fluktuasi beban listrik dan perubahan-perubahan daya di sisi beban yang disuplai oleh generator berpengaruh pada frekuensi dan tegangan terminal generator. Apabila daya yang dikonsumsi di sisi beban tidak disesuaikan dengan daya di sisi pembangkit, maka akan menyebabkan tidak stabilnya tegangan dan frekuensi keluaran.

Banyak aspek yang perlu ditinjau untuk menjamin kualitas pelayanan listrik yang diterima oleh konsumen. Kualitas pelayanan listrik ditentukan oleh mutu listrik yang dihasilkan dalam sistem pembangkitan. Mutu listrik tersebut menyangkut konstan atau tidaknya tegangan dan frekuensi. Untuk memperbaiki kualitas listrik agar tidak merugikan konsumen, maka tegangan dan frekuensi diusahakan konstan. Jika mengalami variasi nilai, maka harus berada pada batas-batas toleransi sesuai standar nasional PLN (Wardhani, 1996).

Indonesia memakai tegangan catu 220 V untuk sistem tegangan rendah dengan frekuensi 50 Hz. Tegangan listrik masih diperbolehkan mengalami variasi pada batas +5% dan -10% dari tegangan catu. Sementara itu variasi frekuensi untuk sistem tenaga listrik Jawa-Bali-Madura diusahakan tidak lebih dari ± 0.5 Hz. Sedangkan untuk sistem-sistem yang lebih kecil di luar Jawa, diusahakan tidak melebihi ± 1.5 Hz (Mulyadi, 1998).

Oleh karena beberapa latar belakang di atas, penulis mencoba melakukan pengaturan tegangan dan frekuensi listrik agar didapat nilai tegangan dan frekuensi yang nominal. Pengaturan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kapasitor eksitasi yang dihubungkan paralel dengan terminal generator induksi dan mengatur kecepatan putaran generator. Mengatur putaran generator berarti juga mengatur besarnya frekuensi listrik. Pengaturan frekuensi dan tegangan yang dihasilkan pusat pembangkit harus saling dikoordinasikan satu sama lain.

1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap perubahan frekuensi dan tegangan generator induksi.
- Bagaimana pengaturan frekuensi sehingga dihasilkan frekuensi nominal.
- Bagaimana pengaturan tegangan sehingga dihasilkan tegangan nominal.
- Bagaimana koordinasi antara pengaturan frekuensi dan tegangan untuk dapat mengantisipasi fluktuasi beban.

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan mengarah sesuai dengan tujuan, maka pembahasan skripsi ini dibatasi hal - hal sebagai berikut :

- Mesin induksi yang digunakan pada pengujian mempunyai daya 3 kW, tegangan Y/ Δ 380/220 V, frekuensi 50 Hz, arus nominal 7/12 A, putaran 1410 rpm, $\cos \phi = 0.83$.
- Energi penggerak generator induksi disimulasikan oleh motor listrik DC penguat terpisah 5 kW, 220 V, 22.7 A, 1500 rpm, tegangan medan 220 V, arus medan 0.71 A yang dikopel pada poros generator induksi.
- Percobaan dilakukan di laboratorium Mesin Listrik Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Generator induksi beroperasi sendiri (*self excited*), tidak terhubung dengan jala-jala.
- Perubahan frekuensi dan tegangan dikarenakan perubahan kecepatan motor penggerak generator, perubahan beban dan jumlah kapasitor yang terpasang.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan agar dengan adanya pengaturan frekuensi dan tegangan keluaran generator induksi didapatkan nilai tegangan dan frekuensi yang nominal, sehingga konsumen memperoleh mutu listrik yang baik dan potensi negatif terjadinya kerusakan peralatan dapat dihindari. Melalui pengontrolan yang dilakukan secara otomatis menyesuaikan dengan perubahan beban diharapkan tidak terjadi pemborosan energi.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari skripsi ini adalah untuk diterapkan pada PLTM Check Dam V Kali Jari Kabupaten Blitar, sehingga masyarakat di daerah tersebut memperoleh energi listrik dengan mutu yang baik.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dari skripsi ini terdiri dari:

- BAB I : Berisi pendahuluan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan, tujuan, manfaat dan sistematika pembahasan.
- BAB II : Berisi dasar teori teknologi PLTM yang meliputi komponen-komponen bangunan sipil PLTM, konversi energi listrik dari tenaga air, turbin air untuk PLTM dan penggunaannya.
- BAB III : Berisi dasar teori generator induksi yang meliputi konstruksi, prinsip kerja generator induksi, eksitasi pada generator induksi, generator induksi yang dioperasikan sendiri dan tegangan keluaran generator induksi.
- BAB IV : Berisi dasar teori sistem pengaturan tegangan dan frekuensi yang meliputi tegangan dan frekuensi pada keadaan mantap, pengaturan tegangan dan pengaturan frekuensi.
- BAB V : Berisi metodologi penyusunan skripsi.
- BAB VI : Berisi perancangan sistem pengatur frekuensi dan tegangan generator induksi.
- BAB VII : Berisi tentang pengujian dan analisis tentang sistem pengaturan frekuensi dan tegangan yang telah dirancang.
- BAB VIII : Berisi kesimpulan dan saran.

BAB II

TEKNOLOGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

2.1 Umum

Program pelistrikan desa bagi desa-desa yang belum mendapat jaringan PLN dilakukan dengan membangun suatu sistem pembangkitan tenaga listrik sesuai dengan potensi yang terdapat di daerah tersebut. Salah satu cara yang ditempuh untuk melaksanakan program pelistrikan desa yaitu dengan membangun suatu Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) apabila di daerah itu tersedia potensi mikrohidro. Pengembangan PLTM oleh PLN telah dimulai sejak sekitar tahun 1970.

PLTM adalah pembangkit listrik tenaga air berukuran kecil, yaitu dengan kapasitas kurang dari 200 kW (Subekti, 1997). Namun sebenarnya belum ada definisi yang baku mengenai pengertian PLTM. Banyak negara maupun lembaga memberikan definisi yang berbeda tentang PLTM, tergantung dari situasi perkembangan teknologi dan pembangunan di negara yang bersangkutan (Suprpto, 1978).

Secara umum pada awal pengembangan PLTM di Indonesia, untuk memperoleh sumber daya air masih tergantung pada proyek-proyek pengairan yang dilakukan oleh Departemen Pekerjaan Umum (DPU). Air untuk memutar sudu-sudu turbin diperoleh dengan memanfaatkan aliran air yang masih tersisa pada saluran-saluran irigasi. Oleh karena itu, pengoperasian PLTM masih menyesuaikan dengan pola pendistribusian air untuk keperluan irigasi. Kemudian sekitar tahun 1980, PLTM mulai dikembangkan secara lebih mandiri tanpa tergantung pada proyek-proyek pengairan (Subekti, 1997).

Tenaga air merupakan sumber daya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*) melalui proses penguapan oleh matahari. Air dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin air pada PLTM. Sama seperti pembangkit tenaga listrik yang memanfaatkan sumber daya alternatif lainnya yang dapat diperbaharui, PLTM bebas polusi dan tidak menyebabkan kerusakan lingkungan. Apabila dibandingkan dengan sistem pembangkit tenaga matahari dan angin yang kapasitasnya tergantung oleh musim dan cuaca, PLTM dapat menghasilkan energi

listrik konstan sepanjang tahun pada daerah-daerah terpencil yang aliran airnya cukup konstan.

Turbin air yang dipakai pada PLTM mempunyai konstruksi yang sederhana dan tidak serumit turbin-turbin yang biasa dipakai pada jenis pembangkit yang lain. Syarat konstruksinya antara lain putaran dan suhu kerjanya rendah, sehingga tidak memerlukan bahan dengan mutu dan ketepatan konstruksi yang tinggi. Oleh karena itu, peralatan untuk membuat turbin PLTM sesuai kapasitas yang diperlukan pada umumnya dapat dikerjakan bengkel-bengkel lokal (Mismail, 1991).

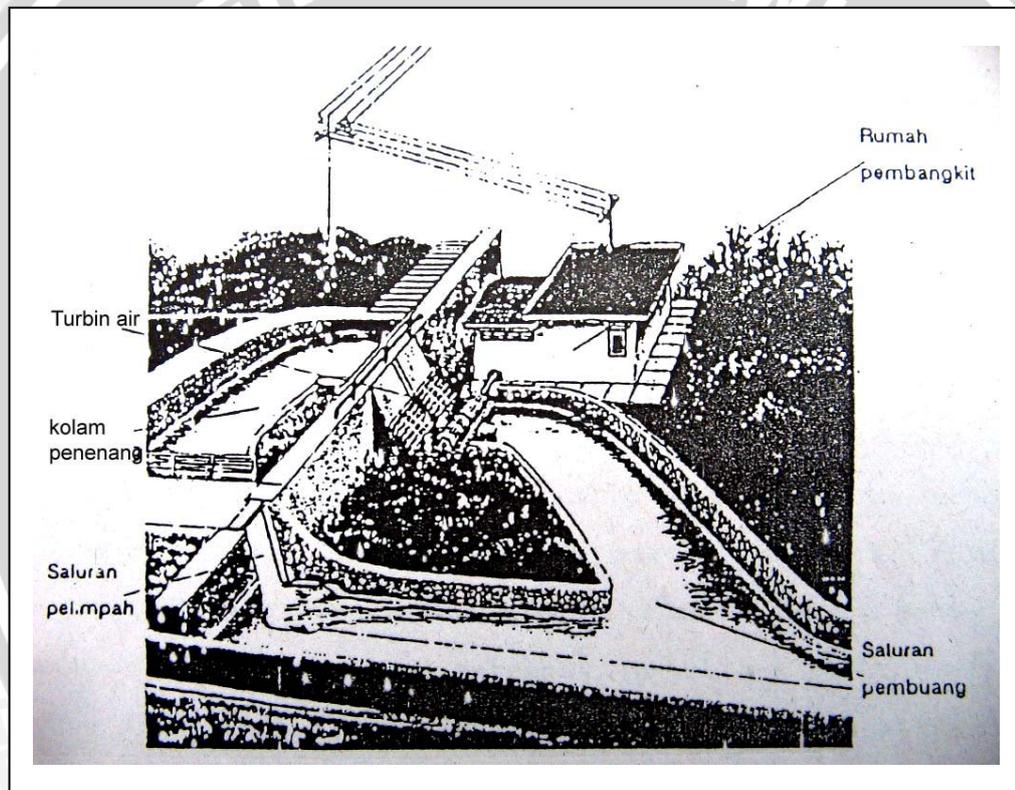
Secara bertahap, sistem mikrohidro dapat ditingkatkan dengan mengganti generator dan jaringan sesuai standar PLN. Apabila jaringan PLN masuk ke desa diharapkan sistem mikrohidro yang telah ada dapat langsung diinterkoneksi. Generator induksi dapat digunakan untuk menyederhanakan proses sinkronisasi pada saat interkoneksi dan untuk tujuan penghematan biaya (Mismail, 1991). Pertimbangan penggunaan generator induksi juga disebabkan beberapa kelebihan lain yang dimiliki. Kelebihan itu antara lain adalah sifatnya yang kokoh dan harganya murah. Dengan berbagai pertimbangan tersebut, generator induksi cocok dipakai di pedesaan yang tingkat keahlian dan kemampuan operator dalam pemeliharaan peralatan masih kurang (Mismail, 1989).

Perubahan beban di daerah pedesaan cenderung lebih tajam dan lebih sulit untuk diramal dibandingkan dengan di daerah perkotaan (Bryce, 1980). Jika mutu listrik pedesaan harus sama dengan seperti yang di kota, maka pengendalian kecepatan dan pengaturan listrik untuk sistem mikrohidro akan memerlukan regulator mekanik dengan pengendalian otomatis dan persyaratan penanganan perawatan yang sama rumitnya dengan listrik di perkotaan.

Parameter yang dipakai untuk menilai mutu listrik antara lain berupa variasi tegangan dan variasi frekuensi listrik. Tegangan nominal sistem jaringan tegangan rendah di konsumen adalah sebesar 220 V untuk tegangan fasa ke netral dan 380 volt antara fasa ke fasa. Variasi tegangan pelayanan di JTR (Jaringan Tegangan Rendah) sesuai dengan SPLN 1: 1995 ditetapkan maksimum +5% dan minimum -10% terhadap tegangan nominal (Mulyadi, 1998). Frekuensi yang digunakan di Indonesia adalah 50 Hz. Variasi frekuensi listrik umumnya tidak

diatur dalam bentuk standar tetapi lebih merupakan sasaran atau petunjuk operasi. Pada sistem di Jawa-Bali-Madura diusahakan variasi frekuensi tidak melebihi ± 0.5 Hz, sedangkan untuk sistem-sistem yang lebih kecil di luar Jawa diusahakan tidak melebihi ± 1.5 Hz (Wardhani, 1996).

PLTM merupakan salah satu sarana penyediaan tenaga listrik dengan harga yang terjangkau oleh kemampuan ekonomi daerah pedesaan. Pengendalian kecepatan dan pengaturan listrik memerlukan biaya yang besar, sehingga pada umumnya PLTM tidak menggunakan pengatur putaran mekanik (*governor*) yang harganya tergolong mahal. Salah satu pilihan yang lebih murah dan lebih andal adalah dengan menggunakan pengatur secara elektronik (Mismail, 1991).



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Sumber: Mismail, 1991: 48

2.2 Komponen- Komponen Bangunan Sipil PLTM

Potensi tenaga air didapat pada sungai yang mengalir di daerah pegunungan. Untuk dapat memanfaatkan potensi dari sungai ini, maka sungai perlu dibendung dan airnya dibelokkan ke bangunan air PLTM. Ditinjau dari cara

membendung air, ada dua metode untuk memperoleh air yang akan digunakan memutar turbin, antara lain:

- Mikrohidro jenis aliran sungai (*run of river*), yaitu air sungai dibelokkan dengan menggunakan bendungan yang dibangun memotong air sungai. Air sungai kemudian diarahkan ke bangunan air PLTM.
- Mikrohidro dengan menggunakan waduk untuk meningkatkan kapasitas air.

Apabila menggunakan waduk, maka pada musim penghujan yang menyebabkan debit air sungai meningkat, air tersebut dapat ditampung dan akan menjadi persediaan air saat musim kemarau tiba. Inilah yang menjadi keuntungan PLTM dengan menggunakan waduk.

Pada PLTM *run of river*, daya yang dibangkitkan tergantung debit air sungai. Tetapi pada PLTM jenis ini, biaya pembangunannya lebih murah daripada PLTM yang menggunakan waduk, karena tidak memerlukan bendungan yang besar dan daerah genangan yang luas.



Gambar 2.2. Komponen-komponen bangunan sipil suatu PLTM

Sumber: Mismail, 1991: 140

Beberapa bagian terpenting pada PLTM yang air untuk memutar turbinnya diperoleh dengan cara menampung dulu di waduk, antara lain:

1. Waduk yang berfungsi untuk menyimpan air yang akan dialihkan ke turbin air, digunakan untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan air agar selama musim kemarau turbin tetap beroperasi, serta menentukan ketinggian jatuh air apabila air dari waduk tersebut langsung dialirkan menuju turbin.
2. Pintu air yang berfungsi untuk mengatur debit air yang akan dialirkan melalui saluran sekaligus sebagai sarana pencegah sampah/kotoran agar tidak masuk ke dalam saluran.
3. Saluran pembawa air yang berfungsi untuk menyalurkan air yang akan melalui pipa pesat, terutama apabila air dari pintu air tidak langsung masuk ke pipa pesat dengan alasan geografis.
4. Bak penampung yang berfungsi untuk mengendalikan volume dan debit air yang akan dialirkan ke turbin melalui pipa pesat, sekaligus sebagai penentu ketinggian jatuh air.
5. Pipa pesat yang berfungsi sebagai media penyalur air dari bak penampung ke turbin. Ada dua jenis pipa pesat, yaitu (a). Tekanan tinggi, terbuat dari bahan logam/baja dan (b). Tekanan rendah, antara lain terbuat dari beton atau PVC. Efisiensi pipa pesat sangat dipengaruhi oleh permukaan penampang aliran serta jumlah belokan.
6. Rumah pembangkit merupakan bangunan yang menjadi tempat peralatan konversi energi dipasang, contoh turbin air, *governor* sebagai pengatur tekanan air, sistem transmisi mekanik (jika diperlukan), generator, peralatan pendukung lain, seperti: panel kontrol, panel distribusi daya, beban komplemen dan sebagainya.
7. Saluran pelimpah adalah saluran yang dipakai untuk mengalirkan kembali air yang telah dimanfaatkan oleh turbin ke sungai.

2.3 Konversi Energi Listrik dari Tenaga Air

Pembangkitan listrik dari tenaga air adalah suatu bentuk perubahan potensi tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik. Mula-mula potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga mekanik oleh turbin air, kemudian turbin air memutar generator yang membangkitkan tenaga listrik.

Daya yang masuk ke generator sesuai dengan Persamaan (2-1) (Arismunandar, 1975: 19):

$$P_{Gin} = 9.8 \eta_T Q h \quad (2-1)$$

dengan :

P_{Gin} = daya masukan generator (kW)

η_T = efisiensi turbin air

Q = debit air (m³/s)

h = tinggi jatuh air (m)

Dari Persamaan (2-1), ada beberapa variabel yang dapat diatur untuk mengubah P_{in} generator yaitu variabel tinggi jatuh dan debit air. Daya keluaran generator berbanding lurus dengan daya yang masuk ke generator dan tergantung pada efisiensi generator itu sendiri, seperti ditunjukkan oleh persamaan:

$$P_{Gout} = 9.8 \eta_T \eta_G Q h \quad (2-2)$$

dengan : η_G = efisiensi generator

Debit air sungai yang merupakan data pokok untuk merencanakan pusat listrik dengan tenaga air, harus diukur secara teliti dan dilakukan dalam jangka waktu yang lama (Arismunandar, 1991). Data mengenai aliran sungai, termasuk perubahannya karena musim sangat diperlukan terutama untuk rancangan proyek mikrohidro jenis aliran sungai (*run of river type*) (Mismail, 1991).

Tinggi jatuh air (*head*) tergantung pada geografi lokasi. Pada umumnya, pembangkit mikrohidro dapat digolongkan dalam dua kategori yang menentukan jenis turbin yang akan dipakai. Jenis *head* tinggi apabila ketinggian jatuh air lebih dari 20 m dan *head* rendah apabila tinggi jatuh air jaraknya sampai dengan 20 m. Tinggi jatuh itu dapat diperoleh dengan membangun rumah pembangkit pada lokasi di bawah bendungan atau dengan membuat saluran dan pipa pesat dari bendungan ke stasiun pembangkit yang terletak jauh di hilir untuk mendapatkan tinggi jatuh yang lebih besar (Mismail, 1991).

2.4 Turbin Air untuk PLTM dan Penggunaannya

2.4.1 Jenis turbin air pada PLTM

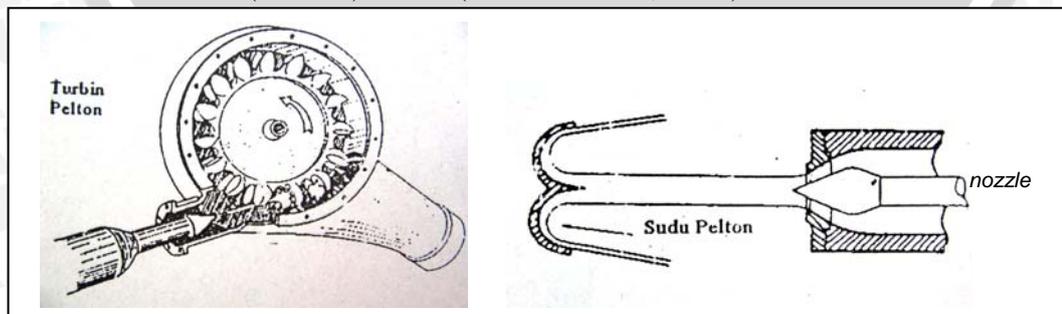
Turbin air memanfaatkan tenaga potensial dan tenaga kinetik yang terdapat pada air untuk memutar rotor (*runner*) turbin, sehingga turbin menghasilkan tenaga mekanik. Selanjutnya, turbin dihubungkan ke generator agar dihasilkan tenaga listrik pada sisi keluaran generator. Daya yang dihasilkan oleh turbin merupakan daya yang masuk pada generator. Sehingga pada Persamaan (2-1), menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh turbin berbanding lurus terhadap tinggi jatuh dan debit air (Mismail, 1991).

Pada PLTM, instalasi yang berupa bangunan sipil diperlukan agar air memiliki tenaga potensial karena letaknya yang tinggi dan memiliki tenaga kinetik karena air dialirkan masuk ke turbin setelah melewati saluran dan pipa pesat. Aliran air yang masuk ke turbin diusahakan seragam, karena keseragaman tersebut akan mempengaruhi efisiensi turbin (Mismail, 1991). Beberapa jenis turbin yang biasa dipakai pada PLTM antara lain:

1. Turbin Pelton

Turbin Pelton telah banyak digunakan untuk PLTM dengan daya mulai dari 5 kW. Turbin ini umumnya digunakan untuk tinggi jatuh yang besar dengan debit yang rendah. Efisiensi turbin dapat mencapai nilai sampai dengan 90% (Mismail, 1991).

Turbin Pelton dapat dikendalikan dengan mengatur debit air yang keluar dari *nozzle*. Pada sekeliling rotor turbin Pelton terdapat ember (*buckets*) yang menerima semburan air dari *nozzle*, seperti terlihat pada Gambar 2.3 (a) dan 2.3 (b). Perubahan yang mengenai *buckets* itu menghasilkan gaya dan gaya tersebut akan memutar rotor (*runner*) turbin (Arismunandar, 1991).



Gambar 2.3 (a). Turbin Pelton (b). Pengatur aliran air pada turbin Pelton

Sumber: Mismail, 1991: 164

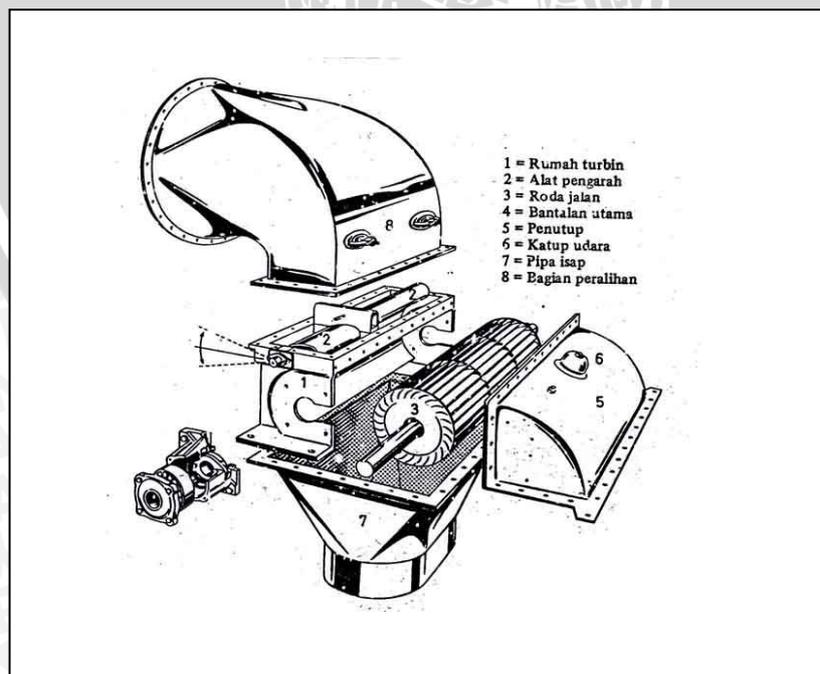
2. Turbin Arus Lintang (*cross flow*)

Turbin arus lintang (*cross flow*) atau yang umumnya dikenal dengan turbin Banki merupakan turbin yang banyak digunakan pada PLTM. *Runner* turbin ini berbentuk seperti sangkar tupai dengan sudu-sudu yang melengkung seperti terlihat pada Gambar 2.4.

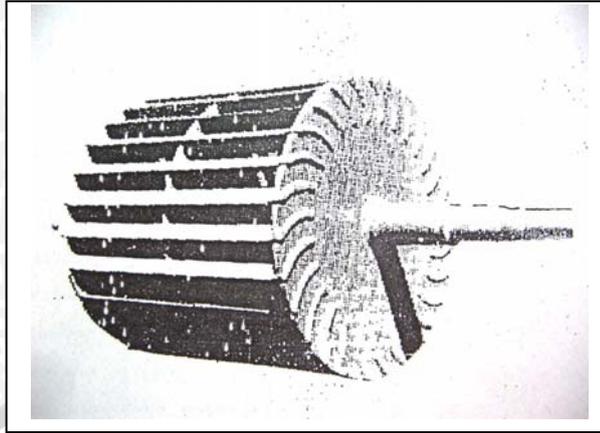
Proses pergerakan air sehingga dapat menggerakkan turbin melewati dua tahap. Pertama-tama, air masuk ke bagian atas turbin, kemudian pada tahap berikutnya air tersebut mengalir jatuh ke bawah mengenai sudu-sudu turbin. Aliran air keluar dari sudu-sudu lewat bagian bawah turbin. Proses pergerakan air dengan cara seperti itu membuat turbin dapat bersih dari kotoran. Sampah yang tersangkut pada bagian atas *runner* saat air masuk akan dibersihkan pada saat *runner* yang berputar berada di posisi keluarnya air (Mismail, 1991).

Turbin ini dikendalikan oleh sudu-sudu pengatur pada saluran air masuk turbin. Banyak sedikitnya air yang masuk dikendalikan oleh sudu pengatur tersebut, sehingga mempengaruhi kecepatan putaran rotor turbin.

Dari segi berat, ukuran dan harganya, turbin arus lintang kurang menguntungkan jika dibandingkan dengan turbin Pelton. Tetapi mempunyai kelebihan konstruksinya yang lebih sederhana sehingga dapat dengan mudah dibuat oleh bengkel lokal (Bryce, 1980).



(a)



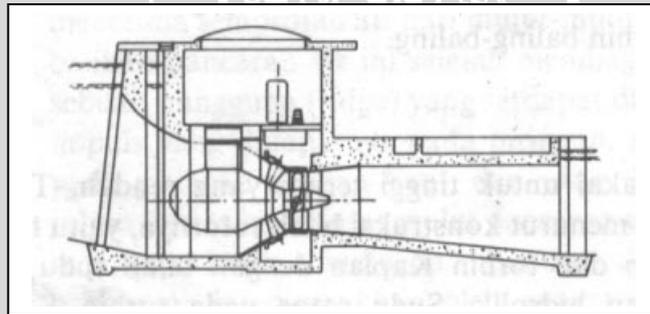
(b)

Gambar 2.4 (a) Turbin arus lintang (*cross flow*).(b) *Runner* turbin arus lintang.

Sumber: Mismail, 1991: 165

3. Turbin Tabung

Turbin ini merupakan turbin baling-baling jenis poros mendatar. Turbin ini dipakai untuk tinggi terjun (*head*) air yang rendah sekali dan menghasilkan daya keluaran rendah sampai dengan menengah.



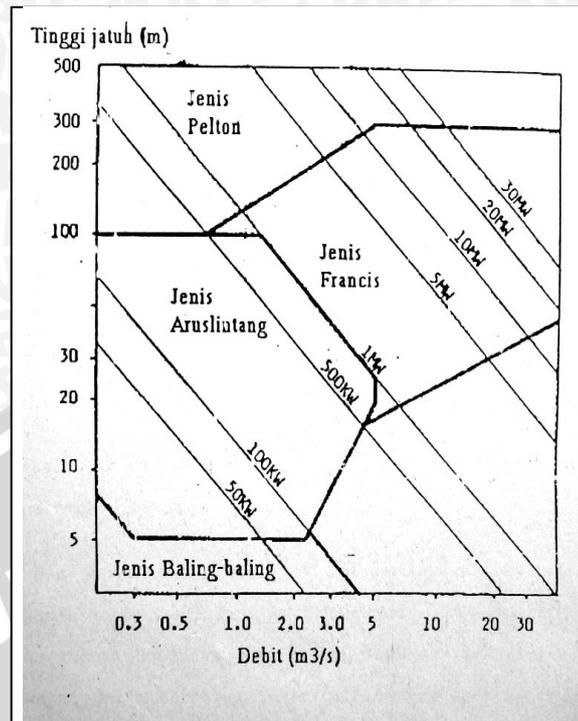
Gambar 2.5 Konstruksi turbin tabung

Sumber: Arismunandar, 1991: 56

2.4.2 Penggunaan turbin

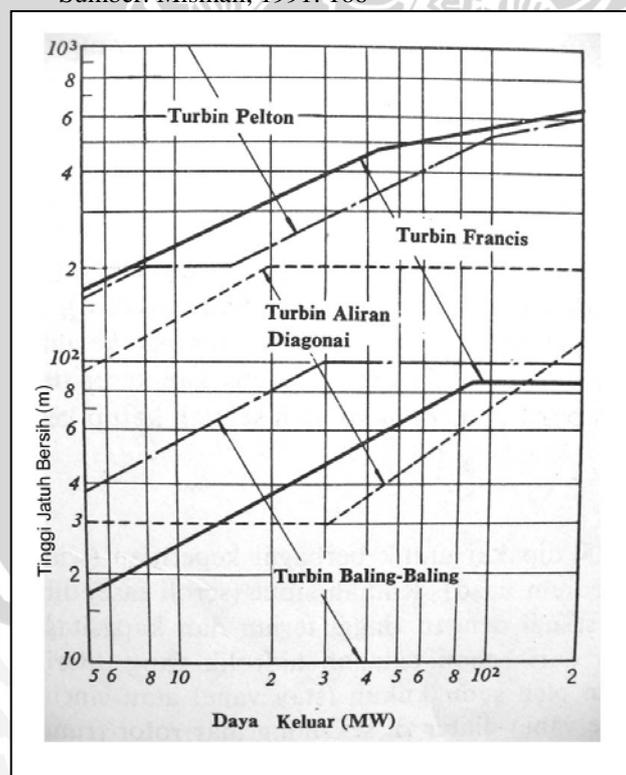
Setiap jenis turbin mempunyai daerah kerja tertentu. Pemilihan jenis turbin disesuaikan dengan tinggi jatuh, debit air dan daya yang dihasilkan. Gambar 2.6 memberikan kawasan untuk berbagai jenis turbin berdasarkan tinggi jatuh dan debit yang tersedia. Gambar 2.7 memberikan kawasan kerja berdasarkan tinggi jatuh air dan daya keluaran yang akan dihasilkan.

Turbin Pelton digunakan untuk tinggi jatuh yang besar dengan debit air yang kecil. Untuk tinggi jatuh air yang kecil dan debit yang besar cocok menggunakan turbin arus lintang (*cross flow*).



Gambar 2.6 Diagram pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit air

Sumber: Mismail, 1991: 166



Gambar 2.7 Diagram pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan daya keluaran generator.

Sumber: Arismunandar, 1991: 53

BAB III

GENERATOR INDUKSI

3.1 Umum

Mesin induksi adalah mesin yang paling banyak digunakan dalam industri. Mesin ini terdiri dari rotor, stator dan celah udara yang terletak di antara rotor dan stator. Disebut sebagai mesin induksi karena stator dicatu arus bolak-balik secara langsung, sementara arus yang mengalir pada rotor diperoleh secara induksi (Sen, 1989).

Aplikasi mesin induksi sebagai generator juga bukan perkembangan yang baru. Mesin induksi sebagai generator induksi telah lama digunakan pada pembangkit listrik tenaga air berkapasitas kecil yang menyuplai energi listrik ke jala-jala (Bryant dan Johnson, 1935). Umumnya generator ini digunakan untuk penyederhanaan proses sinkronisasi pada saat interkoneksi dengan jala-jala (Mcpherson, 1981).

Generator induksi dipakai pada PLTM di daerah pedesaan karena instalasinya sederhana dengan biaya yang murah, sifatnya yang kokoh, serta mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Hal ini sesuai dengan kondisi di daerah pedesaan yang tingkat keahlian dan kemampuan operator PLTM dalam pemeliharaan peralatan masih kurang (Mismail, 1991). Meskipun lebih murah dibandingkan jenis yang lain, tetapi generator induksi memerlukan eksitasi saat dioperasikan tanpa terhubung dengan jala-jala.

Eksitasi secara kontinu dapat dihasilkan oleh kapasitor yang terhubung secara paralel dengan belitan stator generator. Kapasitor tersebut memberikan daya reaktif yang diperlukan oleh generator induksi saat beroperasi sendiri dan terisolasi dari jala-jala.

Terdapat beberapa perbedaan pokok antara generator induksi dengan generator sinkron dilihat dari konstruksi, penguatan, kestabilan, perawatan dan saat interkoneksi dengan jala-jala. Perbandingan antara generator induksi dan generator sinkron diberikan pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1. Perbandingan antara generator induksi dan generator sinkron

Tinjauan	Generator Induksi	Generator Sinkron
konstruksi	- stator generator induksi sama seperti pada generator sinkron - mempunyai jenis rotor berupa rotor belitan dan rotor sangkar. jika rotornya jenis sangkar, maka konstruksinya sederhana dan kuat	- stator generator sinkron sama seperti generator induksi - jenis rotornya hanya berupa rotor belitan. rotornya mempunyai kumparan peredam dan kumparan penguat
penguatan	jika arus penguatan diperoleh dari jala-jala, tidak perlu perlengkapan penguat (<i>exciter</i>)	Memerlukan <i>exciter</i> dan AVR (<i>Automatic Voltage Regulator</i>)
Sinkronisasi	saat diinterkoneksi dengan jala-jala tidak memerlukan <i>synchronizer</i>	membutuhkan <i>synchronizer</i> untuk interkoneksi

Sumber: Meidensha Electric Mfg. Co. Ltd., Induction Generator, halaman 10.

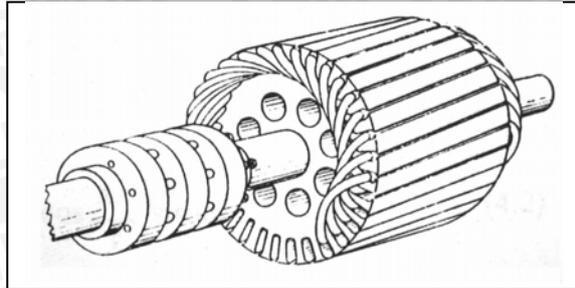
3.2 Konstruksi

Mesin induksi mempunyai dua bagian utama, yaitu: stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian yang berputar (Lister, 1993). Di antara stator dan rotor mesin induksi terdapat celah udara (Nasar, 1995).

Inti stator dibuat dari lapis-lapis pelat baja beralur. Pada stator terdapat belitan fasa tiga yang ditempatkan pada alur stator bagian dalam yang terpisah 120 derajat listrik (Sen, 1989). Belitan ini dapat tersambung secara delta (Δ) maupun bintang (Y).

Rotor mesin induksi terdiri dari laminasi material ferromagnetik. Terdapat dua jenis lilitan rotor, yaitu: rotor belitan dan rotor sangkar. Pada rotor belitan memiliki bentuk belitan yang serupa dengan belitan pada bagian stator (Fitzgerald, 1997). Terminal belitan rotor dihubungkan dengan tiga buah cincin geser (*slip ring*) yang terisolasi dan dipasang pada poros rotor. Sikat karbon yang terpasang pada cincin geser tersebut dapat menghubungkan terminal rotor dengan terminal luar (Fitzgerald, 1992). Konstruksi mesin induksi rotor belitan lebih rumit dibandingkan dengan jenis rotor sangkar. Bagian rotor jenis belitan ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Pada mesin induksi jenis rotor sangkar, susunan rotornya terdiri atas sejumlah batangan aluminium atau baja yang disambung secara elektrik dengan cincin aluminium pada ujungnya (Sen, 1989; Fitzgerald, 1997). Jenis rotor ini membuat konstruksi mesin induksi lebih sederhana dan memudahkan dalam segi perawatan. Perawatan hanya diperlukan pada bagian stator dan pendinginan.



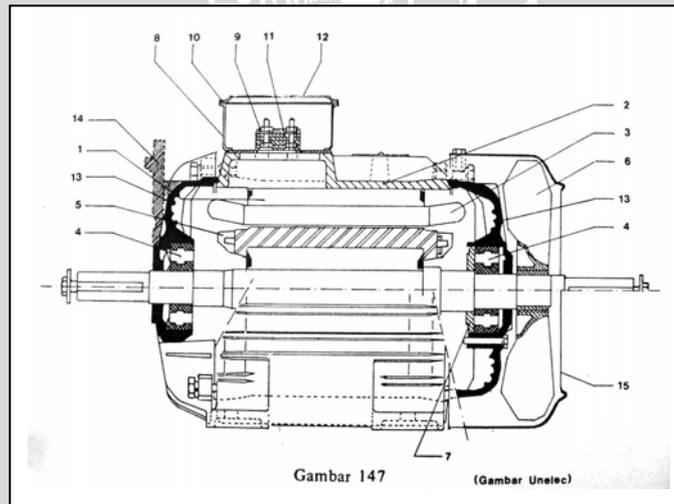
Gambar 3.1 Rotor jenis belitan

Sumber: Nasar, 1995:145



Gambar 3.2 Rotor sangkar (*Squirrel Cage Rotor*)

Sumber: <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/async.htm>



Gambar 3.3 Mesin induksi jenis rotor sangkar

Sumber: Kadir, 1981: 205

Keterangan Gambar 3.3:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1. Ikatan lapisan besi magnet | 9. Strip (plat) |
| 2. Kerangka atau stator | 10. Skrup Jepitan |
| 3. Kumparan stator | 11. Alas jepitan |
| 4. Bantalan | 12. Tutup kotak jepitan |
| 5. Rotor sangkar | 13. Perisai penutup |
| 6. Kipas | 14. Flens |
| 7. Tutup | 15. Tutup kipas |
| 8. Kotak jepitan | |

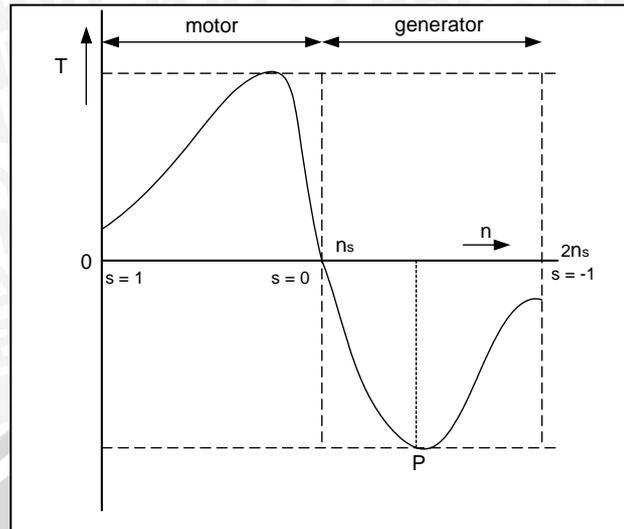
3.3 Prinsip Kerja Generator Induksi

Mesin induksi fasa tiga yang dioperasikan tanpa beban dan terhubung dengan jala-jala, rotornya akan berputar sedikit lebih rendah dari kecepatan sinkronnya. Hal ini terjadi karena torsi mesin dipakai untuk melawan rugi-rugi mekanis yang ditimbulkan oleh gesekan bantalan (*bearing*) dan angin. Bila dipasang suatu beban mekanis pada porosnya, maka mesin tersebut berfungsi sebagai motor dan rotor berputar dengan slip s yang besarnya tergantung dari torsi yang dibutuhkan beban.

Akibat adanya slip, medan magnet putar yang ditimbulkan oleh belitan stator akan memotong batang-batang tembaga (konduktor) rotor. Dengan demikian akan timbul tegangan induksi pada rotor. Karena konduktor rotor antara yang satu dengan yang lain terhubung singkat, maka timbul arus rotor. Interaksi antara medan magnet putar pada stator dan arus pada rotor akan menghasilkan torsi. Torsi ini digunakan untuk memikul beban dan melawan rugi-rugi.

Apabila rotor mesin induksi dihubungkan suatu mesin penggerak dengan arah putaran yang sama tetapi putarannya sedikit lebih cepat dari putaran sinkronnya, maka mesin induksi beroperasi sebagai generator. Pada operasi sebagai generator, seolah-olah medan magnetnya diam dan rotornya yang bergerak memotong medan magnet putar tersebut. Untuk melawan torsi yang ditimbulkan oleh hasil interaksi antara medan magnet stator dengan arus rotor diperoleh dari torsi mesin penggerak.

Gambar 3.4 menunjukkan bahwa saat putaran rotor mulai dari 0 sampai pada putaran n_s (putaran sinkron) mempunyai nilai s (slip) positif dan nilai τ (torsi) positif. Saat torsi positif berarti mesin mengeluarkan (memberikan) torsi yang mana bekerja sebagai motor. Sedangkan untuk putaran di atas kecepatan sinkron, nilai torsi negatif yang berarti mesin membutuhkan torsi. Hal ini menunjukkan mesin bekerja sebagai generator yang membutuhkan torsi dari mesin penggerak mula. Saat perkalian antara torsi dan kecepatan putar bernilai negatif, maka motor induksi akan bekerja sebagai generator induksi (Kadir, 1981)



Gambar 3.4. Karakteristik torsi terhadap kecepatan putaran pada mesin induksi.

Sumber: Bhattacharya, 1986: 65

Mesin induksi beroperasi sebagai generator pada $s < 0$, meskipun mesin induksi tersebut telah menyerap daya dari jala-jala sewaktu beroperasi sebagai motor ($0 < s < 1$). Dengan demikian, tenaga mekanis diubah menjadi tenaga listrik. Slip negatif pada Gambar 3.4 hanya berlaku saat mesin induksi beroperasi sebagai generator induksi yang terhubung dengan jala-jala.

Jika penguat mesin induksi diperoleh dari jala-jala sewaktu beroperasi sebagai generator, maka generator induksi tersebut tidak dapat membangkitkan daya tanpa terhubung dengan jala-jala. Sedangkan untuk generator induksi yang beroperasi sendiri, rangkaian bank kapasitor (*capasitor bank*) diperlukan untuk memberikan daya reaktif (Santoso, 1984).

3.4 Eksitasi Pada Generator Induksi

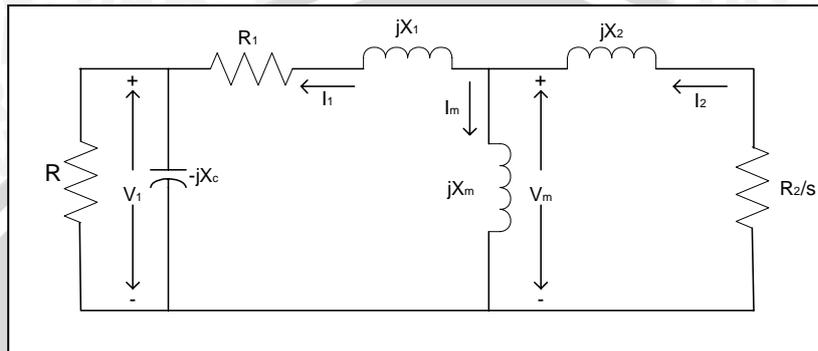
Pada umumnya, generator induksi dioperasikan terhubung dengan jala-jala. Jika rotor mesin induksi dikopel dengan mesin penggerak mula dan diputar di atas kecepatan sinkronnya, maka mesin tersebut akan beroperasi sebagai generator induksi dan menyalurkan daya listrik ke jala-jala.

Daya reaktif yang diperlukan untuk mengeksitasi mesin dapat diperoleh dari jala-jala. Jika generator induksi terhubung dengan jala-jala, maka tegangan dan frekuensinya ditentukan oleh jala-jala (Mismail, 1989).

Daya reaktif juga dapat disuplai oleh kapasitor-kapasitor yang terhubung dengan terminal generator induksi. Dengan susunan ini, maka generator dapat

tegangan remanensi yang telah ada. Medan magnet dihasilkan oleh arus magnetisasi yang diperoleh dari kapasitor eksitasi. Tegangan terinduksi ini selanjutnya akan dikuatkan oleh kapasitor eksitasi yang terhubung di sisi keluaran stator, sehingga tegangan akan dibangkitkan pada terminal keluaran generator.

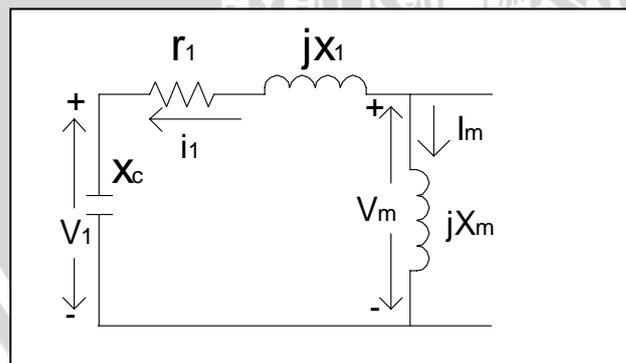
3.5.2 Rangkaian ekivalen generator induksi beroperasi sendiri



Gambar 3.6. Model rangkaian fasa satu generator induksi beroperasi sendiri berbeban pada frekuensi dasar.

Sumber: Mcpherson and Laramore, 1990: 305

Pada Gambar 3.6, reaktansi rangkaian generator induksi beroperasi sendiri diasumsikan diukur pada frekuensi dasar (Mc.Pherson and Laramore, 1990). Rangkaian ekivalen generator induksi fasa tiga beroperasi sendiri tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Rangkaian ekivalen per fasa generator induksi beroperasi sendiri tanpa beban.

Sumber: Mc.Pherson and Laramore, 1990: 308

Keterangan Gambar 3.6:

- V_m = tegangan magnetisasi
- X_m = reaktansi magnetik
- I_m = arus magnetisasi

- V_1 = tegangan terminal generator
 r_1 = resistansi stator
 x_1 = reaktansi stator
 r_2 = resistansi rotor
 x_2 = reaktansi rotor
 s = slip

3.5.3 Kurva Magnetisasi

Pada keadaan tanpa beban, besarnya tegangan magnetisasi adalah (Mc.Pherson and Laramore, 1990):

$$|V_m| = X_m I_m = \left[\left(\frac{V_1^2}{3I_m^2} - r_1^2 \right)^{1/2} - x_1 \right] I_m \quad (3-1)$$

Pada keadaan tanpa beban, arus yang mengalir melalui kapasitor adalah:

$$i_c = v_1 \omega C = \frac{v_1}{X_c} \quad (3-2)$$

Reaktansi stator x_1 sangat kecil dibandingkan reaktansi magnetik X_m dan slip negatif hampir sama dengan nol. Maka arus yang melewati kapasitor seperti pada Persamaan (3-2) adalah sama dengan arus magnetisasi pada kecepatan sinkron.

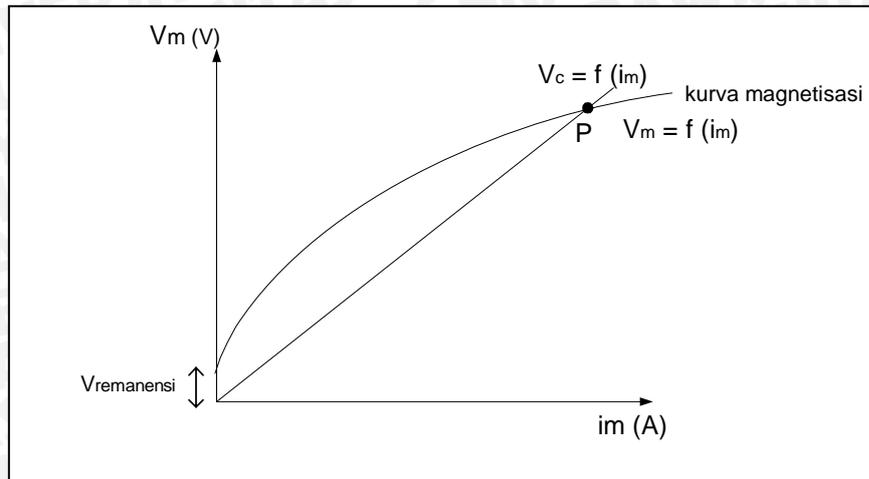
$$i_c X_c = i_m X_m \quad (3-3)$$

sehingga,

$$i_m = \frac{v_m}{X_m} \approx \frac{v_1}{X_m} \quad (3-4)$$

Pada operasi keadaan mantap, garis $i_m X_m$ harus memotong kurva magnetisasi yang merupakan fungsi v_m terhadap i_m seperti dalam Gambar 3.7. Dari Persamaan (3-4) terlihat bahwa besar v_m besarnya sebanding dengan v_1 . Titik operasi P dapat ditentukan, sehingga didapat:

$$v_1 = i_m X_m \quad (3-5)$$



Gambar 3.8. Penentuan titik operasi generator induksi kondisi tanpa beban

Sumber: Nasar, 1995: 183

karena:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3-6)$$

maka

$$i_m = 2\pi f C v_1 \quad (3-7)$$

dari Persamaan (3-7) frekuensi operasi diberikan oleh Persamaan (3-8):

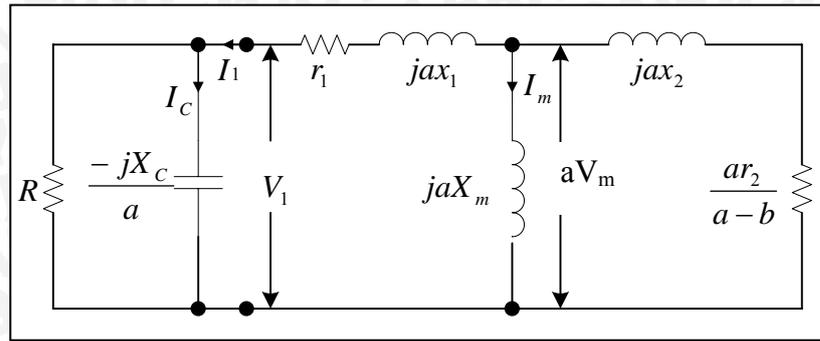
$$f = \frac{i_m}{2\pi C v_1} \quad (3-8)$$

Frekuensi operasi pada umumnya telah ditetapkan, maka dari Persamaan (3-8) akan diperoleh besarnya kapasitor yang diperlukan untuk memberikan daya reaktif pada generator induksi yang beroperasi sendiri (Nasar, 1995).

3.6 Tegangan Keluaran Generator Induksi

Tegangan terminal akan muncul pada generator induksi beroperasi sendiri yang berputar jika inti rotor mempunyai remanensi magnet dan kapasitor eksitasi terhubung dengan terminal keluaran. Mesin yang pernah diputar terlebih dahulu memiliki remanensi magnet yang diperlukan pada rotornya (McPherson and Laramore, 1990).

Model rangkaian fasa tunggal generator induksi beroperasi sendiri yang dipengaruhi frekuensi ditunjukkan seperti pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Rangkaian ekivalen generator induksi penguatan sendiri yang dipengaruhi frekuensi dengan beban resistif

Sumber: Mc.Pherson and Laramore, 1990: 305

Perbandingan antara frekuensi yang dibangkitkan generator dengan frekuensi dasar, yaitu:

$$a = \frac{f}{f_b} \tag{3-9}$$

dengan, f = frekuensi yang dibangkitkan generator

f_b = frekuensi dasar

Perbandingan antara kecepatan generator yang sedang beroperasi ω dengan kecepatan sinkron ω_s adalah b:

$$b = \frac{\omega}{\omega_s} \tag{3-10}$$

dengan, ω = kecepatan generator yang beroperasi

ω_s = kecepatan dasar

Tegangan terinduksi pada celah udara diberikan pada Persamaan (3-11):

$$V_m = aV_{m0} \tag{3-11}$$

dengan, V_m = Tegangan terinduksi celah udara

V_{m0} = Tegangan terinduksi celah udara pada frekuensi dasar

Tegangan pada terminal keluaran generator ditunjukkan oleh Persamaan (3-12):

$$V_1 \approx \frac{aV_{m0}}{1 - a^2(x_1/x_c)} \tag{3-12}$$

BAB IV

SISTEM PENGATURAN TEGANGAN DAN FREKUENSI

4.1 Umum

Pengaturan atau pengontrolan terhadap suatu *plant* (sesuatu yang dikontrol) merupakan suatu proses untuk menjaga agar variabel-variabel keluaran dari *plant* sesuai dengan keinginan (nilai *setting*), meskipun mendapat suatu gangguan.

Sistem pengaturan secara otomatis merupakan sistem kontrol umpan balik dengan acuan masukan atau keluaran yang dikehendaki dapat konstan atau berubah secara perlahan dengan berjalannya waktu. Pengaturan secara otomatis berfungsi untuk menjaga keluaran sebenarnya berada pada nilai yang dikehendaki meskipun terjadi gangguan (Ogata, 1996).

Pengaturan tegangan dan frekuensi pada sistem tegangan rendah (JTR) diperlukan agar peralatan listrik yang memakai tenaga pada sistem ini dapat bekerja dengan kinerja yang baik dalam batas-batas variasi tegangan dan frekuensi yang masih bisa diterima.

Banyak aspek yang perlu ditinjau untuk menjamin kualitas pelayanan listrik yang diterima oleh konsumen. Kualitas pelayanan listrik ditentukan oleh mutu listrik yang dihasilkan dalam sistem pembangkitan. Mutu listrik tersebut menyangkut konstan atau tidaknya tegangan dan frekuensi. Untuk memperbaiki kualitas listrik agar tidak merugikan konsumen, maka tegangan dan frekuensi diusahakan konstan. Jika mengalami variasi nilai, maka harus berada pada batas-batas toleransi sesuai standar nasional PLN (Wardhani, 1996).

Pengaruh tegangan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan banyak kerugian, antara lain mengurangi umur pemakaian lampu penerangan dan peralatan elektronik serta menyebabkan kerusakan peralatan. Sebaliknya, tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan kesulitan pada pengasutan motor (Gonen, 1986).

4.2 Tegangan dan frekuensi pada keadaan mantap

Parameter yang dipakai untuk menilai mutu listrik pada keadaan mantap adalah variasi tegangan, variasi frekuensi, ketidakseimbangan tegangan fasa-fasa

pada sistem fasa tiga dan besar faktor harmonisa. Parameter-parameter tersebut dinilai berdasarkan toleransi atau sasaran berupa standar dan petunjuk operasi.

a. Variasi tegangan

Pada sistem tenaga listrik, tegangan di titik suplai diijinkan bervariasi di atas maupun di bawah tegangan nominal sistem dalam batas-batas yang telah ditentukan. Sesuai standar PLN (SPLN 1: 1995) pada sistem tegangan rendah (JTR) dengan tegangan nominal 220 volt, tegangan pada titik suplai konsumen diijinkan bervariasi maksimum +5% dan minimum -10% dari nilai nominalnya.

b. Variasi frekuensi

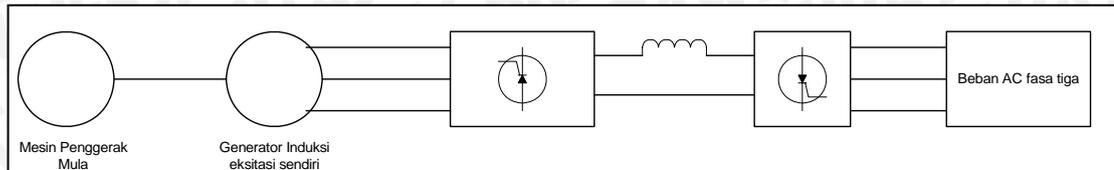
Variasi frekuensi listrik tidak diatur dalam bentuk standar tetapi lebih banyak merupakan sasaran atau petunjuk operasi. Untuk sistem tenaga listrik Jawa-Bali-Madura diusahakan tidak lebih dari ± 0.5 Hertz. Sedangkan untuk sistem-sistem yang lebih kecil di luar Jawa, diusahakan tidak melebihi ± 1.5 Hertz. Tetapi dalam operasi yang sebenarnya variasi frekuensi jauh lebih kecil dari nilai-nilai tersebut (Wardhani, 1996).

4.3 Pengaturan tegangan

Untuk menjaga tegangan berada pada batas yang sesuai standar PLN, maka diperlukan pengaturan tegangan, dengan cara menaikkan tegangan apabila tegangan terlalu rendah dan mengurangi tegangan apabila tegangan terlalu tinggi. Ada beberapa cara untuk melakukan pengaturan tegangan pada generator induksi beroperasi sendiri:

a. Pengaturan tegangan dengan pengkonversi AC-DC-AC

Pengaturan ini menggunakan kapasitor tetap dan tap kapasitor yang dapat diatur. Kapasitor tetap terhubung secara permanen pada mesin untuk memperoleh tegangan pada kecepatan dasar dan pada saat tanpa beban. Hubungan tap kapasitor dapat diatur *on* dan *off* untuk mengontrol tegangan terminal generator dan digunakan pada saat terjadi fluktuasi beban. Generator dan kapasitor terhubung dengan penyearah. Penyearah mengubah tegangan AC menjadi DC. Keluaran tegangan DC tersebut masuk ke inverter yang menghubungkan generator dengan saluran distribusi (Singh and Jain, 1991).



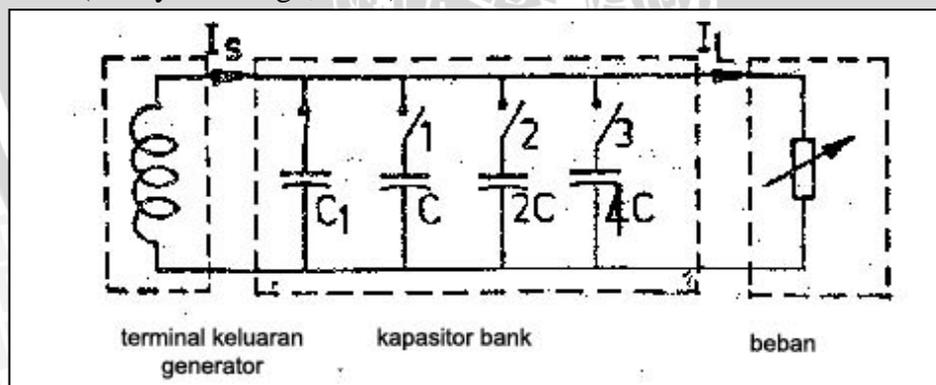
Gambar 4.1 Generator induksi beroperasi sendiri dengan konversi AC-DC-AC

Sumber: Singh and Jain, 1991: 96

- b. Pengaturan tegangan melalui penyalan SCR untuk mengatur tap kapasitor eksitasi

Cara pengaturan tegangan pada generator induksi eksitasi sendiri dapat dilakukan dengan sistem elektronik. Pada pengatur tegangan secara elektronik, tegangan keluaran generator diukur oleh transformator tegangan. Tegangan keluaran trafo tersebut akan dibandingkan oleh tegangan referensi. Selisih antara tegangan trafo dengan tegangan referensi akan mengatur penyalan SCR (*Silicon Controlled Rectifier*). SCR ini selanjutnya mengatur besar kapasitor yang terhubung dengan terminal generator, sehingga arus eksitasi yang dihasilkan kapasitor dapat berubah-ubah (Marsudi, 2003).

Pada Gambar 4.2 kapasitor terhubung dapat berubah mulai kapasitor minimum untuk generator induksi tanpa beban sampai dengan kapasitor maksimum untuk beban penuh. Hubungan tap 1, 2, 3 dapat diatur melalui peralatan semikonduktor elektronika daya ataupun dengan kontaktor elektro mekanik (Murthy and Singh, 1996).



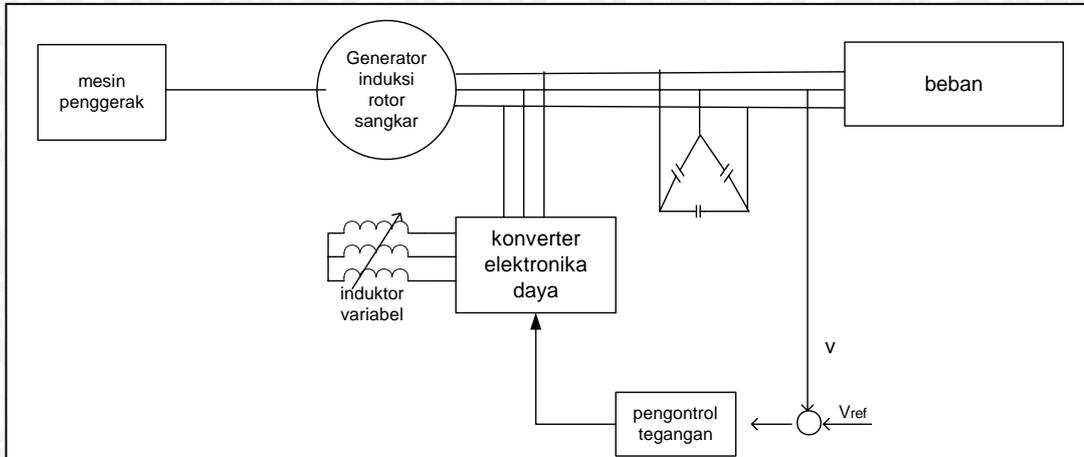
Gambar 4.2 Tap kapasitor

Sumber: Murthy and Singh, 1996: 682

- c. Pengaturan tegangan dengan mengatur daya reaktif kapasitor eksitasi

Terminal keluaran generator induksi terhubung dengan kapasitor yang nilainya tetap. Kapasitor ini digunakan untuk mengatasi kebutuhan eksitasi untuk

beban penuh. Arus yang melewati induktor berubah-ubah karena adanya perubahan sudut penyalan konverter elektronika daya.



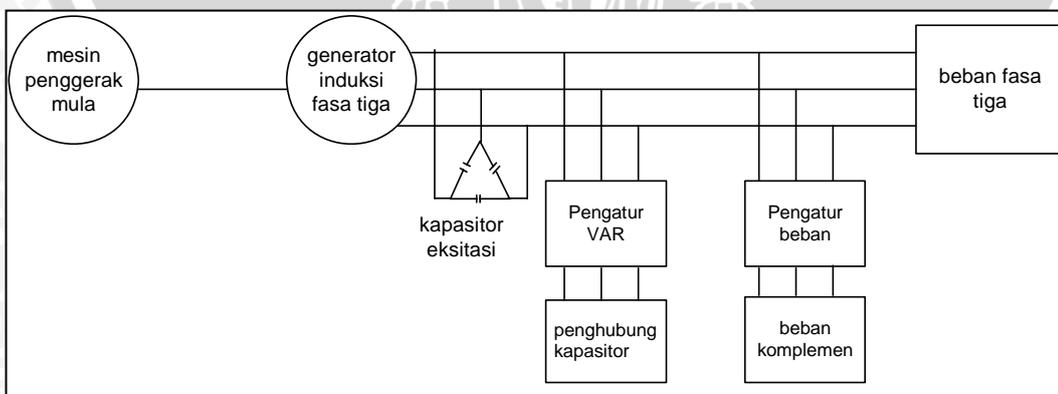
Gambar 4.3 Pengontrol tegangan sistem elektronik dengan mengatur besar kapasitor yang terpasang.

Sumber: Boldea and Nasar, 2002: 636

d. Pengatur tegangan dengan sistem beban komplemen

Beban komplemen merupakan beban pengganti yang digunakan apabila jumlah beban terpasang generator berkurang, sehingga generator tetap dapat memberikan daya total yang telah ditentukan (Suprpto, 1984).

Pada pengaturan tegangan dengan sistem beban komplemen, keluaran yang diharapkan konstan adalah beban total generator induksi. Arus yang mengalir ke beban komplemen diatur oleh pengatur beban. Pengatur beban memonitor tegangan keluaran generator induksi dan mengatur sudut penyalan SCR untuk mengatur jumlah beban beban komplemen agar tegangan keluaran tetap konstan (Murthy and Jose, 1998).



Gambar 4.4 Pengatur tegangan dengan sistem beban komplemen

Sumber: Murthy and Jose, 1998: 462

4.4 Pengaturan Frekuensi

Pengukuran frekuensi yang dihasilkan generator dilakukan dengan mengukur kecepatan putar poros generator, karena frekuensi generator sebanding dengan kecepatan putar porosnya (Marsudi, 2003).

Frekuensi yang dibangkitkan generator dipengaruhi oleh kecepatan putar poros generator ditunjukkan pada Persamaan 4.1 (Mc.Pherson and Laramore, 1990):

$$f = \frac{p \omega_s}{4 \pi} = \frac{p \omega}{4 \pi (1-s)} \quad (4-1)$$

dengan, f = frekuensi keluaran generator (Hz)

p = jumlah kutub

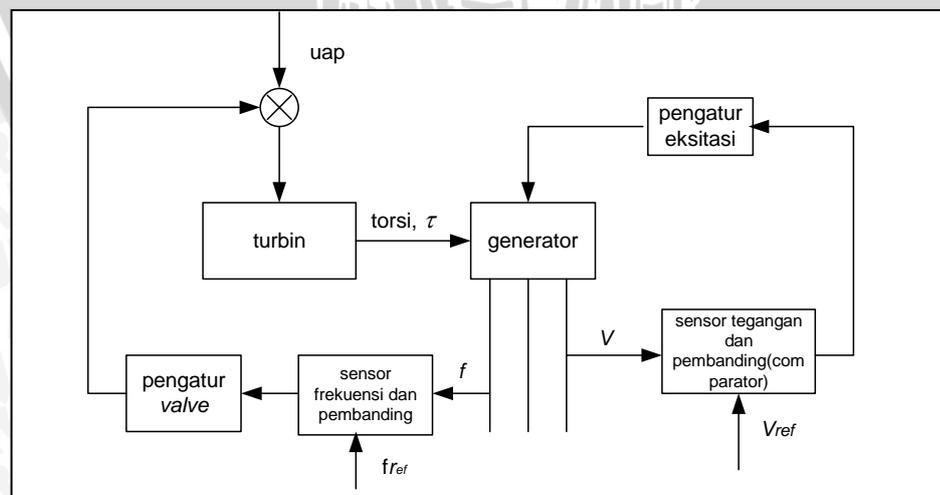
ω_s = kecepatan dasar (rpm)

ω = kecepatan generator yang beroperasi (rpm)

s = slip

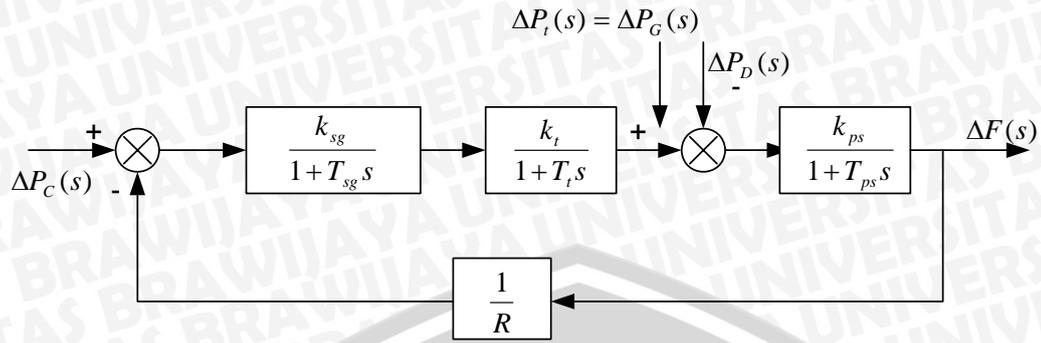
4.5 Sistem Pengaturan Frekuensi dan Tegangan Pada Generator

Skema sistem pengaturan frekuensi dan tegangan pada generator, baik dengan masukan ke turbin berupa uap maupun air ditunjukkan pada Gambar 4.5. Uap maupun air yang masuk ke turbin diatur sehingga kecepatan generator yang mempengaruhi pada frekuensi yang dihasilkan tetap konstan. Eksitasi generator juga diatur sehingga tegangan yang dihasilkan konstan.



Gambar 4.5 Skema sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator

Sumber: Nagrath, 1980: 266



Gambar 4.6 Blok diagram model pengaturan frekuensi pada sistem pembangkit terisolasi

Sumber: Nagrath, 1980: 272

Keterangan Gambar 4.6:

$\frac{k_{sg}}{1+T_{sg}s}$ = model matematis *speed governor*
(governor kecepatan)

$\frac{k_t}{1+T_t s}$ = model matematis turbin

$\frac{k_{ps}}{1+T_{ps}s}$ = model matematis sistem pembangkit

$\Delta P_C(s)$ = sinyal referensi

$\Delta P_D(s)$ = kenaikan beban

$\Delta P_t(s)$ = keluaran turbin

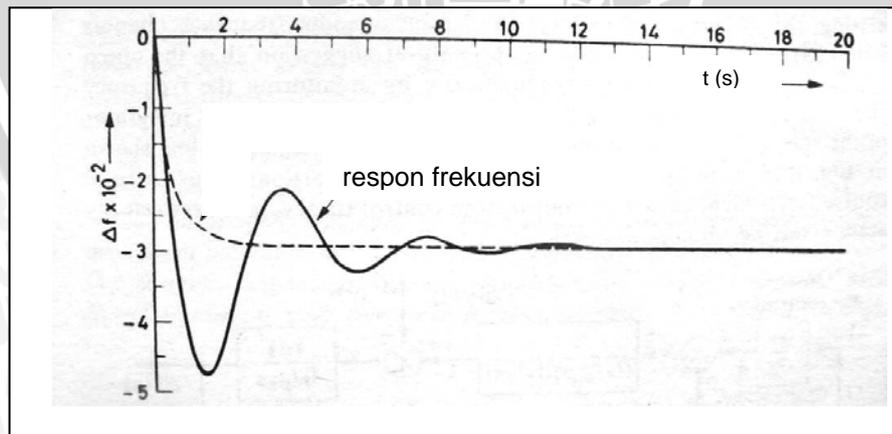
$\Delta P_G(s)$ = keluaran generator

$\Delta F(s)$ = frekuensi keluaran

$\frac{1}{R}$ = umpan balik untuk *speed governor*

Perubahan frekuensi terhadap perubahan beban ditunjukkan pada

Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik respon pengatur frekuensi terhadap perubahan beban

Sumber: Nagrath, 1980: 277

BAB V

METODOLOGI PENELITIAN

5.1 Umum

Frekuensi keluaran generator induksi dipengaruhi oleh kecepatan putar poros generator dan slip. Apabila putaran naik, maka frekuensi juga naik. Begitu juga sebaliknya. Tegangan keluaran generator induksi beroperasi sendiri dipengaruhi oleh frekuensi dan kapasitor eksitasi yang terhubung. Tegangan keluaran berbanding lurus dengan frekuensi dan kapasitor eksitasi.

Perubahan kecepatan putaran turbin sebagai penggerak mula menyebabkan perubahan frekuensi dan tegangan keluaran generator induksi. Perubahan-perubahan daya di sisi beban yang disuplai oleh generator berpengaruh pada frekuensi dan tegangan terminal generator. Apabila daya yang dikonsumsi di sisi beban tidak disesuaikan dengan daya di sisi pembangkit, maka akan menyebabkan tidak stabilnya tegangan dan frekuensi keluaran.

Tegangan dan frekuensi diusahakan konstan sesuai standar PLN. Untuk memperbaiki kualitas listrik agar tidak merugikan konsumen, maka tegangan dan frekuensi diusahakan konstan. Jika mengalami variasi nilai, maka harus berada pada batas-batas toleransi sesuai standar nasional PLN.

Penelitian ini meliputi perancangan pengatur tegangan dan frekuensi yang digunakan serta pengujian hasil perancangan. Pada penelitian dilakukan pengujian pengaruh perubahan beban terhadap perubahan tegangan dan arus jangkar putaran penggerak mula serta perubahan arus, tegangan dan frekuensi generator induksi.

5.2 Obyek Penelitian

Obyek penelitian pada skripsi ini adalah perancangan pengatur frekuensi dan tegangan generator induksi.

5.3 Studi Literatur

Dalam studi literatur ini mempelajari tentang :

1. Teori dasar PLTM
2. Teori dasar generator induksi.

3. Teori dasar sistem pengatur tegangan dan frekuensi.

5.4 Pengumpulan Data

Bentuk data yang digunakan adalah

1. Data hasil pengukuran perubahan beban terhadap perubahan arus, daya, putaran, tegangan dan frekuensi generator induksi
2. Data hasil pengukuran perubahan beban terhadap perubahan arus medan, arus jangkar, tegangan medan dan tegangan jangkar motor penggerak mula.
3. Data hasil pengukuran arus beban, arus kapasitor dan jumlah kapasitor yang terpasang.
4. Data hasil perhitungan perancangan alat yang dibuat.

5.5 Perancangan Alat

Perancangan alat terdiri dari perancangan pengatur frekuensi, perancangan pengatur tegangan serta perancangan koordinasi pengatur frekuensi dan tegangan. Pada tahap ini dirancang alat yang akan dibuat dengan disertai perhitungan-perhitungan nilai komponen yang akan digunakan.

5.6 Pengujian Alat dan Analisis

Pengujian terdiri atas enam pengujian, antara lain

1. Pengujian karakteristik generator induksi.
2. Pengujian sensor putaran..
3. Pengujian pengatur frekuensi.
4. Pengujian sensor tegangan.
5. Pengujian pengatur tegangan.
6. Pengujian koordinasi pengatur frekuensi dan tegangan.

5.7 Penarikan Kesimpulan

Dari hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang dilakukan akan didapatkan kesimpulan bagaimana sistem pengaturan yang tepat pada saat terjadi perubahan tegangan dan frekuensi generator induksi.

BAB VI

PERANCANGAN SISTEM PENGATUR FREKUENSI DAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI

6.1 Sistem Pengatur Frekuensi dan Tegangan

Tegangan keluaran generator induksi dipengaruhi oleh frekuensi keluaran generator dan kapasitor eksitasi yang terhubung pada terminal keluaran. Menurut Persamaan 3-12, tegangan ditentukan oleh frekuensi dan kapasitor eksitasi. Semakin besar frekuensi, maka tegangan juga semakin besar. Begitu juga bila nilai kapasitor eksitasi yang terhubung semakin besar, maka tegangan semakin tinggi. Bila nilai frekuensi dan kapasitor eksitasi semakin kecil, maka tegangan akan semakin rendah.

Sesuai dengan Persamaan 4-1, frekuensi yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan generator saat beroperasi dan nilai slip. Frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan poros generator. Jika kecepatan semakin tinggi, maka frekuensi yang dihasilkan akan besar. Tetapi frekuensi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan slip generator.

Menurut standar PLN (SPLN 1: 1995) pada sistem tegangan rendah (JTR) dengan tegangan nominal 220 volt, tegangan pada titik suplai konsumen diijinkan bervariasi maksimum +5% dan minimum -10% dari nilai nominalnya. Sehingga batas minimum tegangan yang diijinkan adalah sebesar 198 volt dan batas maksimum sebesar 231 volt. Apabila tegangan keluaran generator terletak di antara $198 \leq V_{\text{out}} \leq 231$, maka peralatan pengatur tegangan tidak aktif. Di luar kawasan tegangan tersebut memerlukan pengaturan sehingga tegangan selalu berada pada batas-batas yang sesuai dengan standar PLN.

Frekuensi standar yang dipakai di Indonesia adalah sebesar 50 Hz. Variasi frekuensi untuk sistem tenaga listrik Jawa-Bali-Madura diusahakan tidak lebih dari ± 0.5 Hz dan ± 1.5 Hz untuk di luar Jawa. Pada perancangan ini, variasi frekuensi yang dipakai adalah ± 0.5 Hz. Apabila frekuensi terletak di antara $49.5 \leq f_{\text{out}} \leq 50.5$ Hz, maka peralatan pengatur frekuensi tidak aktif

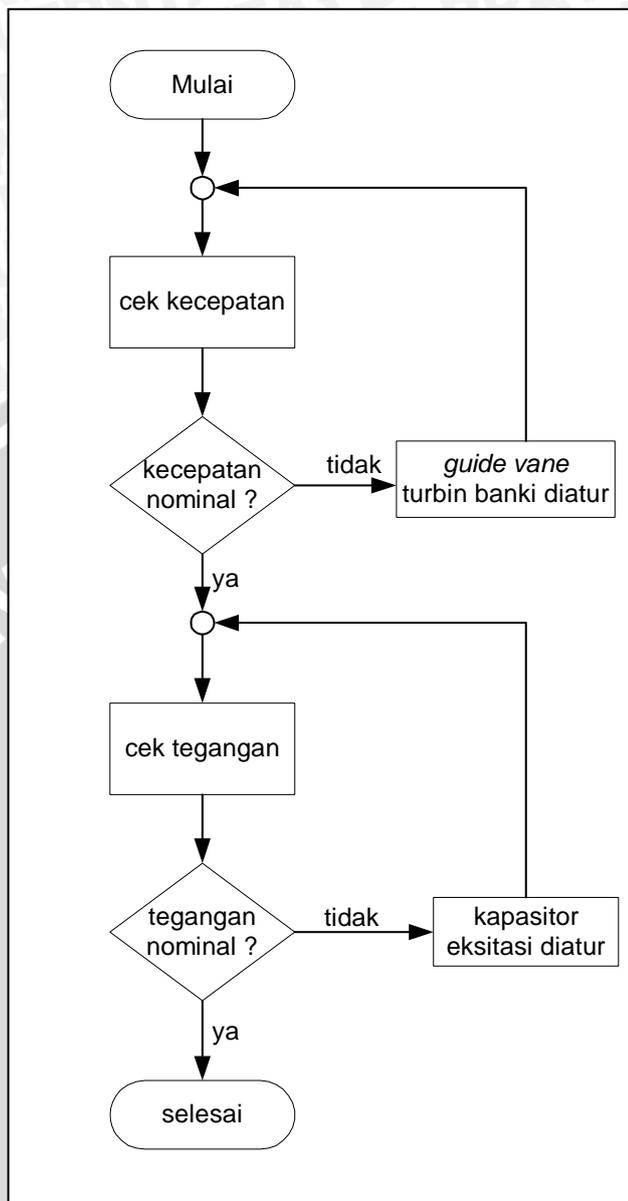
Pengaturan frekuensi dilakukan terlebih dahulu yang selanjutnya dilakukan pengaturan tegangan. Pengaturan frekuensi dilakukan terlebih dahulu

karena besar kecilnya tegangan juga dipengaruhi oleh frekuensi. Pengaturan frekuensi dan tegangan dikoordinasikan sehingga pengaturan tegangan akan dilakukan apabila nilai frekuensi telah mencapai nominal. Apabila dengan pengaturan frekuensi sudah dicapai tegangan yang nominal, maka tidak diperlukan lagi pengaturan tegangan. Proses koordinasi pengaturan tegangan dan frekuensi ditunjukkan pada Gambar 6.1.

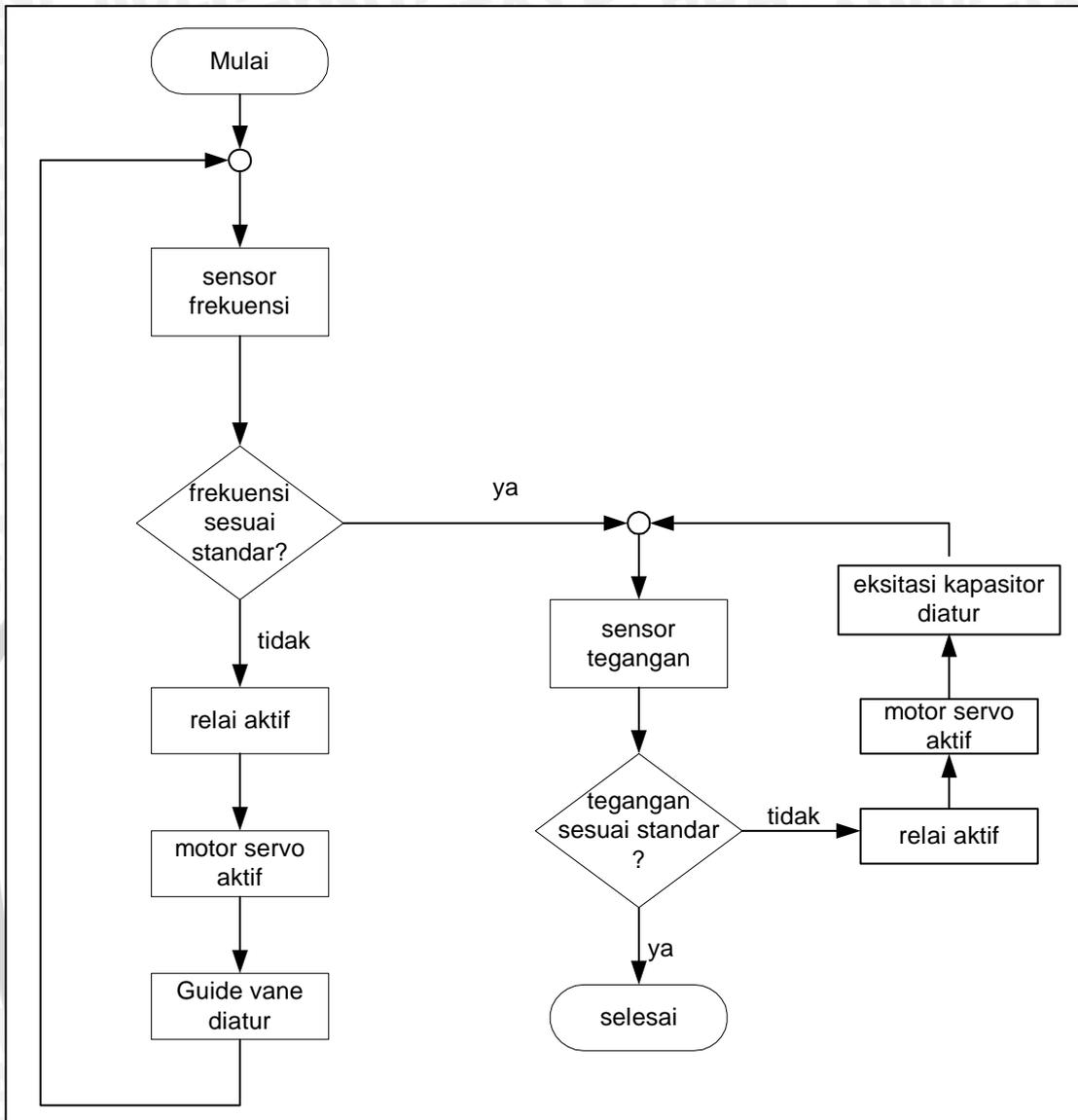
Pengaturan frekuensi dilakukan dengan melakukan pengecekan kecepatan putaran poros generator. Apabila frekuensi di luar kawasan yang diijinkan, maka dilakukan pengaturan *guide vane*. *Guide vane* merupakan sudu antar yang dapat diatur pembukaannya, sehingga kapasitas air yang masuk ke sudu-sudu rotor turbin banki (*cross flow*) PLTM Kalijari dapat diatur. Pengaturan pembukaan *guide vane* ini dengan memanfaatkan perubahan arah putaran motor servo yang terhubung secara mekanik dengan *guide vane* tersebut.

Kemudian apabila frekuensi telah nominal, dilakukan pengecekan tegangan. Apabila tegangan masih belum nominal maka dilakukan pengaturan tap kapasitor yang terhubung pada terminal generator. Pengaturan tap kapasitor tersebut menggunakan perubahan arah putaran motor servo yang terhubung secara mekanik dengan susunan tap kapasitor eksitasi. Tap kapasitor dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.2. Sistem pengaturan frekuensi dan tegangan tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.2.





Gambar 6.1. Diagram alir koordinasi pengaturan frekuensi dan tegangan.



Gambar 6.2. Sistem pengatur frekuensi dan tegangan generator induksi beroperasi sendiri

6.2 Perancangan Sistem Pengaturan Frekuensi dan Tegangan

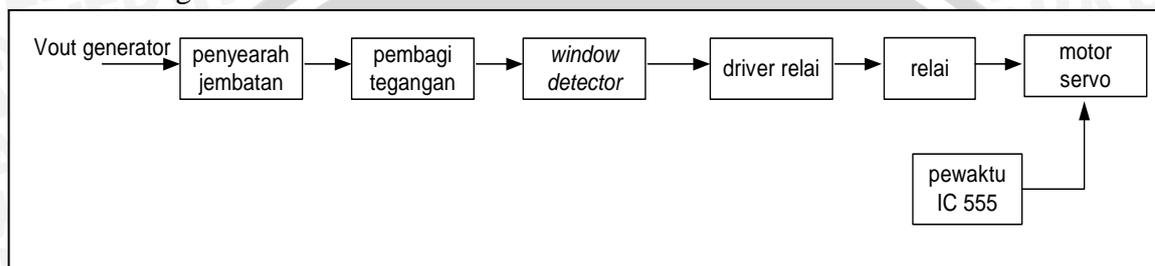
Dari perencanaan sistem pengaturan frekuensi dan tegangan di atas, ada dua blok rangkaian sistem pengaturan, yaitu rangkaian pengatur frekuensi dan rangkaian pengatur tegangan.

Rangkaian pengatur frekuensi bekerja apabila frekuensi tidak sesuai standar dengan mengaktifkan motor servo untuk mengatur *guide vane* pada turbin banki. Rangkaian pengatur tegangan bekerja apabila rangkaian pengatur frekuensi sedang tidak aktif atau frekuensi telah berada pada batas standar. Rangkaian pengatur tegangan mengaktifkan motor servo untuk mengatur posisi tap kapasitor eksitasi apabila tegangan tidak sesuai standar.

6.2.1 Pengatur tegangan

6.2.1.1 Pengatur elektronik

Rangkaian pengatur tegangan berfungsi untuk mengatur tegangan agar tetap berada pada batas standar PLN (SPLN 1: 1995). Sesuai dengan standar tersebut, variasi tegangan terletak pada batas $198 \leq V_{out} \leq 231$ volt (ac). Jika tegangan melebihi atau kurang dari kawasan tegangan tersebut, maka rangkaian pengatur tegangan mengatur posisi tap kapasitor yang terhubung pada terminal keluaran generator.

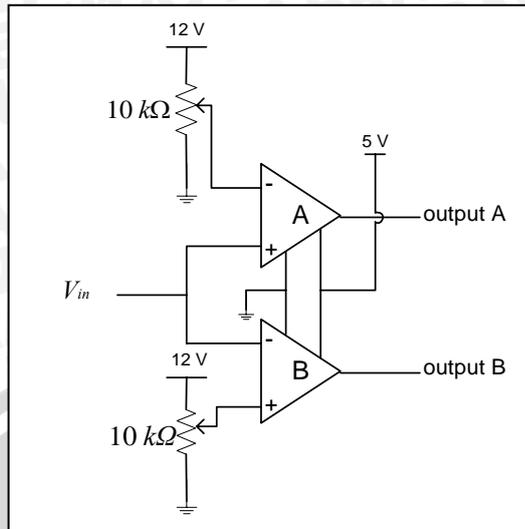


Gambar 6.3 Skematik rangkaian pengatur tegangan

Tegangan keluaran generator induksi perlu disearahkan menjadi tegangan dc dan masuk ke pembagi tegangan untuk untuk mendapatkan tegangan dc yang rendah. Hal ini karena rangkaian pengatur memerlukan tegangan dc yang rendah untuk operasinya.

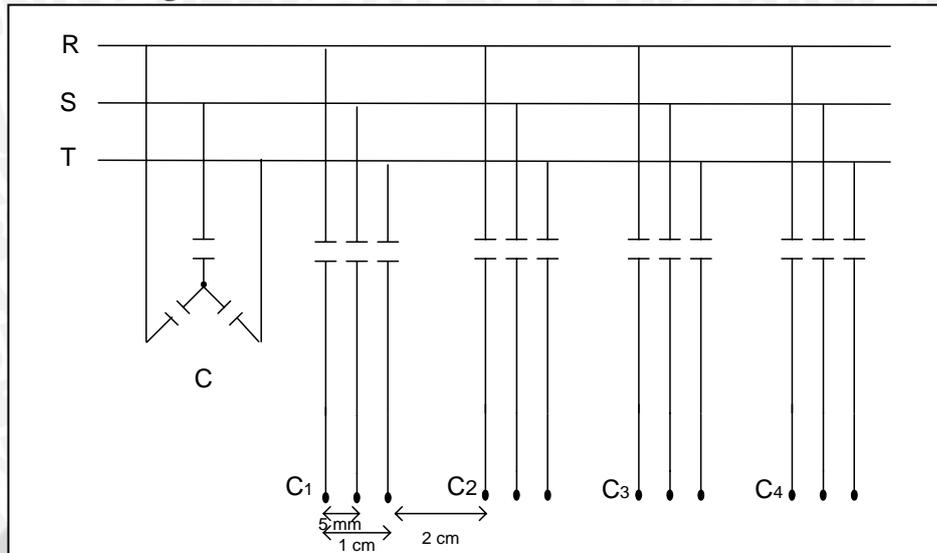
Rangkaian *window detector* digunakan untuk memonitor suatu tegangan masukan dan menunjukkan apakah tegangan tersebut melebihi atau kurang dari tegangan yang telah ditentukan. Tegangan yang telah ditentukan itu menjadi batas tegangan referensi bagi LM 358. Batas bawah dan atas untuk tegangan referensi LM 358 diperoleh dengan menyearahkan dan membagi tegangan 198 dan 231 volt (ac) yang merupakan batas minimum dan maksimum tegangan keluaran generator yang diijinkan. Agar besarnya tegangan referensi dapat diatur, maka digunakan resistor variabel.

Batas atas tegangan referensi LM 358 terletak pada masukan negatif penguat kerja A. Sementara batas bawah tegangan referensi LM 358 terletak pada masukan positif penguat kerja B. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 6.4.

Gambar 6.4 Rangkaian *window detector*

Tegangan yang masuk (V_{in}) ke *window detector* merupakan tegangan keluaran dari pembagi tegangan dan mencerminkan tegangan keluaran generator induksi. Apabila V_{in} melebihi standar tegangan yang ditetapkan, maka relai yang terhubung pada *output A* akan bekerja. Terhubungnya relai ini akan menyebabkan putaran motor servo mengatur posisi tap kapasitor, sehingga jumlah kapasitor eksitasi yang terhubung ke generator berkurang. Jika tegangan V_{in} yang masuk ke *window detector* kurang dari batas yang telah ditetapkan, maka relai yang terhubung pada *output B* akan bekerja. Terhubungnya relai tersebut akan menyebabkan putaran motor servo mengatur posisi tap kapasitor, sehingga jumlah kapasitor eksitasi yang terhubung pada generator meningkat. Sedangkan jika V_{in} berada pada kawasan batas tegangan referensi, maka relai yang terhubung pada *output A* dan *B* tidak bekerja. Sehingga, motor servo tidak bekerja untuk melakukan pengaturan posisi tap kapasitor.

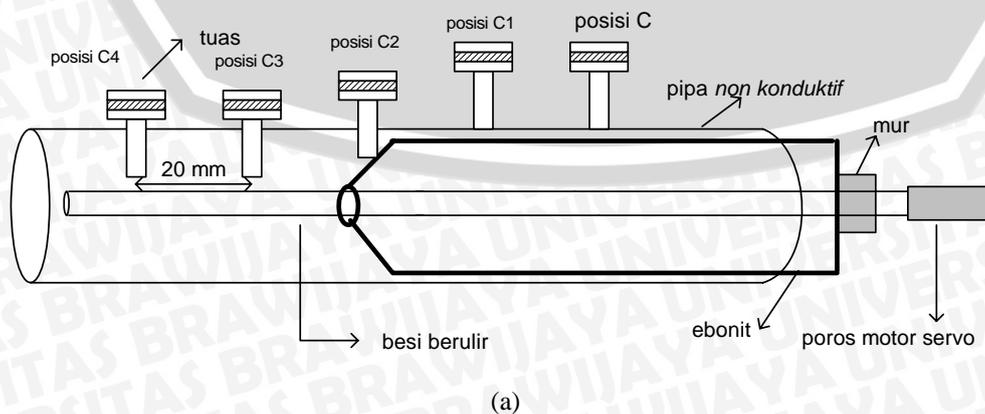
6.2.1.2 Rancangan mekanik

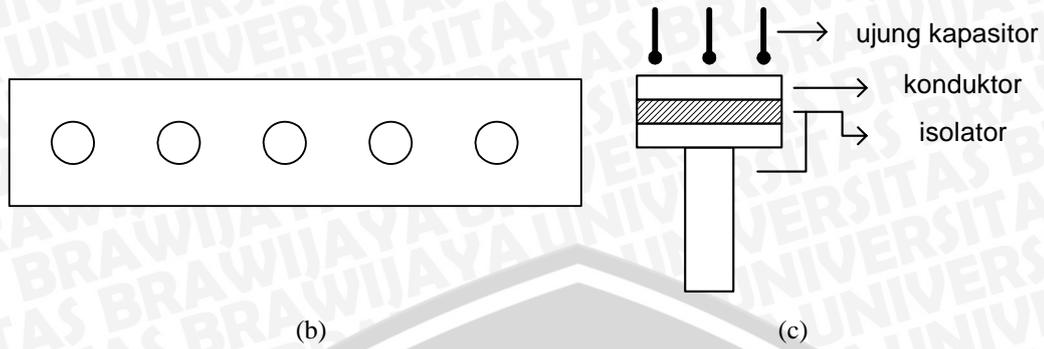


Gambar 6.5 Susunan posisi kapasitor tanpa beban (C) dan tap kapasitor (C₁, C₂, C₃ dan C₄)

Pada Gambar 6.5 kapasitor terhubung dapat berubah mulai kapasitor minimum untuk generator induksi tanpa beban sampai dengan kapasitor maksimum untuk beban penuh. Untuk menambah kapasitor satu langkah posisi tap, maka motor servo berputar ke kanan.

Gambar 6.6 menunjukkan rancangan mekanik penggerak posisi tap kapasitor. Mur besi berulir mendorong ebonit ke kanan dan ke kiri sehingga tuas pada Gambar 6.6 (a) dan (c) dapat naik dan turun untuk menghubungkan kapasitor. Jarak antar tap 2 cm, sehingga pemindahan dari satu tap ke tap yang lain memerlukan 20 putaran besi berulir. Jarak tersebut ditempuh motor servo yang berputar dengan kecepatan 5 rps dalam waktu 4 detik. Selama periode 4 detik tersebut motor servo harus *on*. Sedangkan untuk mengurangi jumlah kapasitor terhubung, motor servo berputar ke kiri.

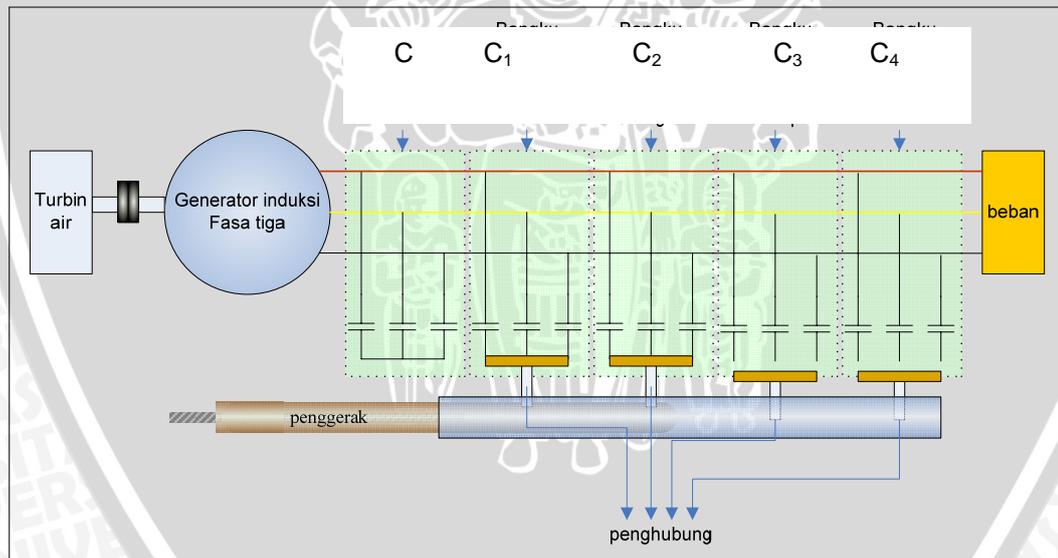




Gambar 6.6 (a).Susunan penggerak posisi tap kapasitor (b). Tampak atas posisi lubang untuk tempat tuas pada pipa *non konduktif* (c). Tuas penghubung ujung kapasitor

Pengaturan waktu *on* dan *off* motor servo dilakukan oleh rangkaian pewaktu yang menggunakan IC 555. Rangkaian ini berfungsi untuk menghasilkan pulsa-pulsa tegangan yang akan digunakan untuk mengatur periode *on* dan *off* motor servo.

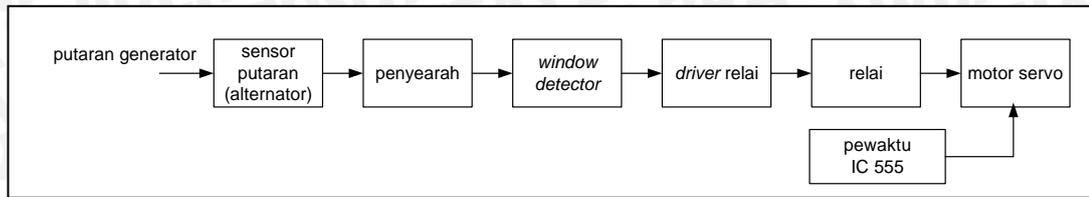
Hubungan kapasitor yang digunakan adalah hubungan Y. Kapasitor terhubung secara bintang saat tuas penghubung ujung kapasitor pada Gambar 6.7 menyentuh ujung *tap* kapasitor.



Gambar 6.7. Pemasangan *exciter* pada generator induksi yang beroperasi sendiri

6.2.2 Pengatur frekuensi

Rangkaian pengatur frekuensi berfungsi untuk mengatur frekuensi agar tetap berada pada batas variasi frekuensi, yaitu $\pm 1\%$ atau ± 0.5 Hz untuk frekuensi 50 Hz. Jika frekuensi melebihi atau kurang dari kawasan tegangan tersebut, maka rangkaian pengatur tegangan mengatur posisi *guide vane*, sehingga kapasitas air yang masuk ke sudu-sudu turbin dapat diatur.



Gambar 6.8 Skematik rangkaian pengatur tegangan

Sensor putaran digunakan pada rangkaian pengatur frekuensi ini untuk mendeteksi terjadinya perubahan putaran generator. Pada perancangan sistem pengatur ini alat yang digunakan adalah alternator. Fungsi alternator serupa dengan fungsi tachogenerator. Prinsip kerjanya adalah mengubah putaran yang dikenakan pada porosnya menjadi tegangan pada terminal keluarannya. Apabila putaran generator yang dikopel pada poros alternator berubah, maka tegangan yang keluar pada terminal keluaran alternator juga berubah.

Alternator yang digunakan adalah tipe 6PC-12V-6W. Alternator ini memiliki dua jenis terminal tegangan keluaran, yaitu terminal 2.5 V dan 12 V. Pemilihan terminal yang digunakan dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

Motor servo yang digunakan berupa motor dc magnet permanen. Fungsinya pada pengatur tegangan ini adalah untuk merubah posisi *guide vane* melalui perubahan arah putaran motor servo. Perubahan arah putaran motor servo ini tergantung dari penutupan kontak relai yang terhubung pada *output A* dan *output B window detector*. Untuk memeperlebar bukaan *guide vane*, motor servo berputar ke kanan. Sedangkan untuk mengurangi bukaan *guide vane*, motor servo berputar ke kiri.

BAB VII

PENGUJIAN DAN ANALISIS

7.1 Umum

Pengujian yang dilakukan terdiri dari enam macam, antara lain :

1. Pengujian karakteristik generator induksi.
2. Pengujian sensor putaran.
3. Pengujian pengatur frekuensi
4. Pengujian sensor tegangan
5. Pengujian pengatur tegangan
6. Pengujian koordinasi pengatur frekuensi dan tegangan

7.2 Pengujian Karakteristik Generator Induksi

7.2.1 Tujuan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik generator induksi kondisi tanpa beban dan berbeban, saat tegangan dan putaran diusahakan konstan pada keadaan nominal.

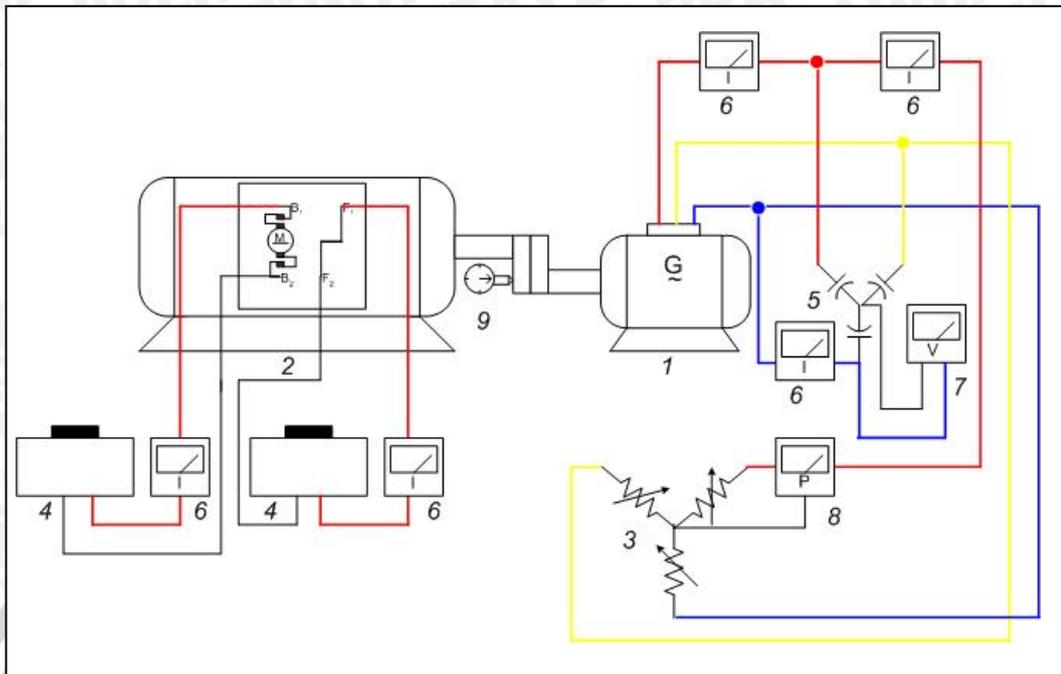
7.2.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Generator induksi fasa tiga
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah
3. Resistor variabel.
4. Regulator.
5. Bangku kapasitor (*capasitor bank*).
6. Amperemeter.
7. Voltmeter.
8. Wattmeter fasa satu.
9. Tachometer.

7.2.3 Rangkaian Pengujian

Untuk menentukan karakteristik sebuah generator induksi dapat dilakukan pengujian seperti pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Rangkaian pengujian karakteristik generator induksi

7.2.4 Prosedur Pengujian

1. Generator induksi dikopel dengan motor dc penguat terpisah.
2. Terminal keluaran generator dihubungkan dengan kapasitor secara paralel.
3. Tegangan jangkar motor dc dinaikkan hingga putaran generator berada pada putaran nominalnya.
4. Setelah generator induksi menghasilkan tegangan, beban fasa tiga dimasukkan dan dinaikkan secara bertahap.
5. Setiap penambahan beban diikuti dengan penambahan besarnya nilai kapasitor yang dipasang untuk menaikkan tegangan generator sebesar tegangan nominalnya.
7. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain arus jangkar motor (I_a), arus medan motor (I_f), arus generator (I_g), arus kapasitor (I_c), arus beban (I_b), tegangan jangkar (V_a), tegangan medan (V_f), tegangan generator (V_g), kapasitor yang terpasang (C), putaran generator (n) dan daya beban (P).

7.2.5 Hasil Pengujian

Hasil pengujian diperlihatkan pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Hasil pengujian karakteristik generator induksi

Data ke	Motor dc penguat terpisah				Generator induksi							
	V_a (volt)	I_a (A)	V_f (volt)	I_f (A)	n (rpm)	C (μF)	$V_g(L-N)$ (volt)	I_g (A)	I_c (A)	I_b (A)	f (Hz)	P_{out} (watt)
1	200	1.8	200	0.68	1502	50	215	3.1	3.1	0	50	0
2	210	4.1	200	0.69	1509	50	200	3.1	3	0.5	50	20
3	210	5.1	200	0.68	1514	54	210	3.5	3.6	0.57	50	35
4	210	6.3	200	0.67	1521	54	200	3.4	3.3	0.94	50	75
5	210	5.6	220	0.68	1500	54	200	3.4	3.3	0.81	49.5	50
6	210	6.2	200	0.66	1513	54	200	3.4	3.3	0.9	50	70
7	285	9.7	200	0.65	1545	58.5	200	4	3.9	1.5	50	220
8	280	8.7	200	0.64	1525	60	225	4.4	4.6	1.05	50	180
9	245	8.6	200	0.64	1519	60	225	4.4	4.5	1.05	49.5	180
10	225	8.2	200	0.64	1500	60	220	4.2	4.3	1	49	165
11	260	10.4	200	0.64	1540	60	200	4.1	4	1.6	50	240
12	220	8.2	200	0.67	1500	60	200	4	4	1.15	49	180
13	230	8.8	220	0.67	1494	64.5	215	4.2	4.2	1.2	49	200
14	230	8.8	220	0.67	1500	64.5	215	4.1	4.1	1.2	49	200
15	240	10.1	210	0.68	1500	68.5	220	4.6	4.8	1.35	49	225
16	240	8.5	210	0.7	1596	91.5	220	5.6	5.2	3.1	50	510

Pada pengujian ini semua besaran yang dicatat dalam satuan per fasa. Dari hasil pengujian di atas jika beban dinaikkan, sementara tegangan dan putaran generator dijaga konstan, maka kapasitor harus ditambah.

Pada Tabel 7.1, saat kapasitor yang terpasang sebesar $50 \mu F$ tegangan yang dihasilkan adalah 215 volt pada putaran nominal 1502 rpm. Pada arus beban 0.57 A, maka kapasitor $50 \mu F$ yang terpasang tidak mencukupi untuk tetap menghasilkan tegangan nominal pada putaran nominal, sehingga kapasitor harus dinaikkan menjadi $54 \mu F$.

7.3 Pengujian Sensor Putaran

7.3.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mendapatkan tegangan keluaran alternator pada putaran tertentu generator. Tegangan yang dihasilkan alternator

atau PMG (*Permanent Magnet Generator*) akan menjadi tegangan masukan rangkaian pengatur frekuensi.

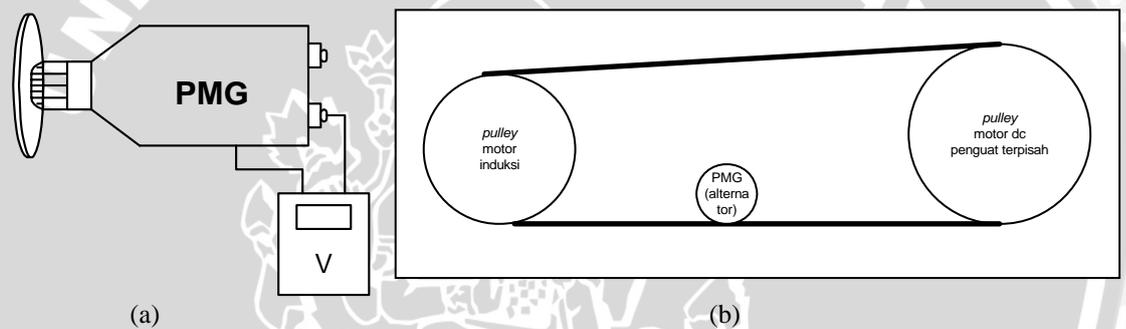
7.3.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Motor induksi.
2. Motor dc penguat terpisah.
3. Alternator atau PMG (*Permanent Magnet Generator*).
4. Regulator.
5. Voltmeter
6. Tachometer.

7.3.3 Rangkaian Pengujian

Rangkaian pengujian ditunjukkan dalam Gambar 7.2.



Gambar 7.2 (a). PMG atau alternator (b). Letak *pulley alternator*

7.3.4 Prosedur Pengujian

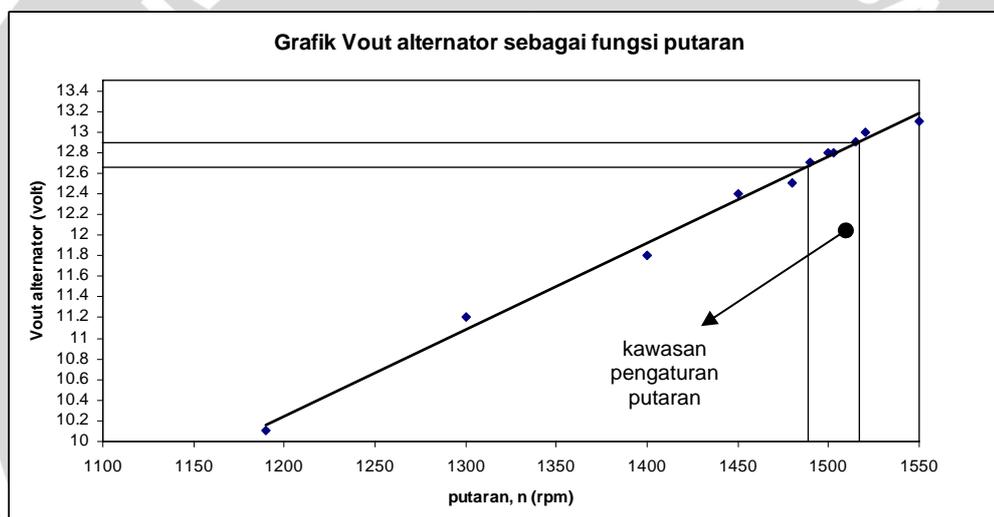
1. Alternator yang telah diberi *pulley* dihubungkan pada *belt* yang menghubungkan motor induksi dengan motor dc penguat terpisah.
2. Motor induksi diputar mulai kecepatan 1190 rpm dan dinaikkan bertahap hingga putaran 1550 rpm.
3. Setiap perubahan putaran, akan menghasilkan perubahan tegangan keluaran alternator.
4. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain tegangan keluaran alternator atau PMG (V_{out} PMG) dan putaran motor induksi (n).

7.3.5 Hasil Pengujian

Hasil pengujian diperlihatkan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Hasil pengujian alternator pada berbagai putaran

Putaran, n (rpm)	V_{out} PMG (volt)
1190	10.1
1300	11.2
1400	11.8
1450	12.4
1480	12.5
1490	12.7
1500	12.8
1503	12.8
1515	12.9
1520	13
1550	13.1



Gambar 7.3 Grafik tegangan keluaran alternator sebagai fungsi putaran.

Putaran nominal generator induksi pada frekuensi nominal 50 Hz adalah 1500 rpm. Pengaturan frekuensi susahakan bervariasi $\pm 1\%$ dari frekuensi nominal 50 Hz, sehingga pengaturan putaran berada pada kawasan 1485 sampai dengan 1515 rpm. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 7.3.

Pengujian dilakukan pada putaran 1190 – 1550 rpm untuk mencari berapa tegangan keluaran sensor putaran saat generator mengalami variasi frekuensi yang masih berada di kawasan yang diijinkan. Dari Tabel 7.2 didapatkan hasil pengukuran, pada putaran 1485 rpm tegangan keluaran alternator sebesar 12.6 volt (ac) dan pada putaran 1515 rpm menghasilkan 12.9 volt (ac). Kedua tegangan tersebut akan masuk ke rangkaian penyearah dan pembagi tegangan (lihat

Lampiran 2) pada rangkaian pengatur frekuensi yang selanjutnya menjadi masukan ke rangkaian *window detector*.

Tabel 7.3. Tegangan keluaran rangkaian penyearah dan pembagi tegangan pada pengatur frekuensi

Putaran (rpm)	V_{out} PMG(volt)	V_{dc} (volt)
1485	12.6	5.45
1500	12.8	5.56
1515	12.9	5.6

7.4 Pengujian Pengatur Frekuensi

7.4.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari pengatur frekuensi untuk kondisi tanpa beban maupun berbeban saat frekuensi yang dihasilkan generator induksi mengalami variasi nilai.

7.4.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Generator induksi fasa tiga.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah.
3. Alternator
4. Pengatur frekuensi.
5. Regulator.
6. Bangku kapasitor (*capasitor bank*).
7. Amperemeter.
8. Voltmeter AC.
9. Tachometer.

7.4.3 Prosedur Pengujian

1. Alternator dipasang untuk mendeteksi perubahan putaran generator induksi.
2. Terminal keluaran 12 V pada alternator disambungkan pada masukan pengatur frekuensi.
3. Generator diputar hingga menghasilkan tegangan keluaran.
4. Pengujian dilakukan pada keadaan tanpa beban, kemudian beban mulai dimasukkan.

5. Saat generator mengalami perubahan putaran, diamati kinerja rangkaian pengatur frekuensi dan motor servo yang terhubung dengan keluaran pengatur frekuensi.
6. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain, putaran generator (n).

7.4.4 Hasil Pengujian

Hasil pengujian pengatur frekuensi generator induksi pada kondisi tanpa beban dan berbeban ditunjukkan dalam Tabel 7.4.

Tabel 7.4 Hasil pengujian pengatur frekuensi.

Data ke	putaran, n (rpm)	pengatur frekuensi	aksi mekanik pada <i>guide vane</i>
1	1423	aktif	memperlebar bukaan
2	1469	aktif	memperlebar bukaan
3	1510	tidak aktif	tidak ada aksi
4	1503	tidak aktif	tidak ada aksi
5	1558	aktif	memperkecil bukaan
6	1494	tidak aktif	tidak ada aksi

Pengatur frekuensi aktif saat putaran generator induksi kurang dari 1485 rpm dan lebih dari 1515 rpm. Saat putaran berada pada kawasan $1485 \leq n \leq 1515$ rpm, maka pengatur frekuensi tidak aktif.

Saat putaran generator induksi kurang dari 1485 rpm pengatur frekuensi aktif dan menyebabkan putaran motor servo pada penerapan di lapangan akan memperlebar bukaan *guide vane*, sehingga kapasitas air yang masuk ke turbin diperbesar. Dengan memperbanyak jumlah air yang masuk, berarti meningkatkan putaran turbin dan generator induksi. Saat putaran generator induksi lebih dari 1515 rpm, pengatur frekuensi aktif dan menyebabkan motor servo pada penerapan di lapangan akan memperkecil bukaan *guide vane*, sehingga kapasitas air yang masuk ke turbin berkurang. Hal ini akan menyebabkan putaran turbin dan generator induksi diperlambat. Saat pengatur frekuensi tidak aktif, berarti frekuensi telah berada pada kawasan yang diijinkan, sehingga tidak diperlukan pengaturan frekuensi.

7.5 Pengujian Sensor Tegangan

7.5.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari sensor tegangan saat tegangan generator induksi mengalami variasi nilai.

7.5.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Generator induksi fasa tiga.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah.
3. Pengatur tegangan
4. Regulator.
5. Bangku kapasitor.
6. Amperemeter.
7. Voltmeter AC.
8. Tachometer.

7.5.3 Prosedur Pengujian

1. Terminal keluaran generator induksi dihubungkan ke masukan pengatur tegangan.
2. Generator diputar hingga menghasilkan tegangan keluaran.
3. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain tegangan keluaran generator per fasa (V_g), dan tegangan keluaran sensor tegangan yang berupa rangkaian penyearah dan pembagi tegangan pada pengatur tegangan (V_{dc}).

7.5.4 Hasil Pengujian

Hasil pengujian sensor tegangan ditunjukkan dalam Tabel 7.5.

Tabel 7.5. Hasil Pengujian sensor tegangan

V_g (volt)	V_{dc} (volt)
220	1.95
230	2.04
198	1.78

Sensor tegangan berupa rangkaian penyearah dan pembagi tegangan pada rangkaian pengatur tegangan (lihat Lampiran 1). Tegangan keluaran dari sensor tersebut akan menjadi tegangan referensi pada rangkaian *window detector* pengatur tegangan.

7.6 Pengatur Tegangan

7.6.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari pengatur tegangan untuk kondisi tanpa beban maupun berbeban saat tegangan generator induksi mengalami variasi nilai.

7.6.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Generator induksi fasa tiga.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah.
3. Pengatur tegangan
4. Resistor variabel.
5. Regulator.
6. Bangku kapasitor (*capasitor bank*).
7. Amperemeter.
9. Voltmeter AC.
10. Tachometer.

7.6.3 Prosedur Pengujian

1. Terminal keluaran generator dihubungkan ke masukan pengatur tegangan.
2. Generator diputar hingga menghasilkan tegangan keluaran.
3. Pengujian dilakukan pada keadaan tanpa beban, kemudian beban mulai dimasukkan.
4. Saat generator induksi mengalami perubahan tegangan keluaran, diamati kinerja rangkaian pengatur tegangan dan motor servo yang terhubung dengan keluaran pengatur tegangan.
5. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain tegangan keluaran generator per fasa (V_g).

7.6.4 Hasil Pengujian

Hasil pengujian pengatur tegangan generator induksi pada kondisi tanpa beban dan berbeban ditunjukkan dalam Tabel 7.6

Tabel 7.6 Hasil pengujian pengatur tegangan.

Data ke	V_g (volt)	pengatur tegangan	aksi mekanik pada tap kapasitor
1	160	aktif	menambah kapasitor
2	200	tidak aktif	tidak ada aksi
3	215	tidak aktif	tidak ada aksi
4	240	aktif	mengurangi kapasitor
5	220	tidak aktif	tidak ada aksi
6	245	aktif	mengurangi kapasitor
7	170	aktif	menambah kapasitor
8	180	aktif	menambah kapasitor

Pengatur tegangan akan aktif saat tegangan yang dihasilkan generator induksi kurang dari 198 volt atau lebih dari 231 volt. Saat tegangan berada pada kawasan $198 \leq V_{\text{out}} \leq 231$ volt, maka pengatur tegangan tidak aktif.

Saat tegangan generator induksi kurang dari 198 volt pengatur tegangan aktif yang menyebabkan putaran motor servo servo pada penerapan di lapangan akan menambah jumlah kapasitor eksitasi yang terhubung, sehingga penguatan generator induksi diperbesar. Dengan memperbanyak jumlah kapasitor yang terhubung, berarti meningkatkan tegangan generator induksi. Saat tegangan generator induksi lebih dari 231 volt, putaran motor servo servo pada penerapan di lapangan akan mengurangi jumlah kapasitor yang terhubung, sehingga penguatan generator induksi berkurang. Hal ini akan menyebabkan tegangan generator induksi diperkecil. Saat pengatur tegangan tidak aktif, berarti tegangan telah berada pada kawasan yang diijinkan, sehingga tidak diperlukan pengaturan tegangan.

7.7 Pengujian Koordinasi Pengatur Tegangan dan Frekuensi

7.7.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari koordinasi pengatur tegangan dan frekuensi, saat frekuensi dan tegangan bervariasi nilainya.

7.7.2 Peralatan

Peralatan-peralatan yang digunakan adalah

1. Generator induksi fasa tiga.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah.
3. Pengatur frekuensi dan tegangan yang telah dikoordinasikan.
4. Resistor variabel.
5. Regulator.
6. Bangku kapasitor (*capasitor bank*).
7. Amperemeter.
8. Voltmeter AC.
9. Tachometer.

7.7.3 Prosedur Pengujian

1. Alternator dipasang untuk mendeteksi perubahan putaran generator induksi.

2. Terminal keluaran 12 V pada alternator disambungkan pada masukan pengatur frekuensi.
3. Terminal keluaran generator induksi dihubungkan ke masukan pengatur tegangan.
4. Generator diputar hingga menghasilkan tegangan keluaran.
5. Pengujian dilakukan pada keadaan tanpa beban, kemudian beban mulai dimasukkan.
6. Saat generator mengalami perubahan putaran, diamati kinerja pengatur frekuensi dan tegangan serta kinerja motor servo.
7. Besaran yang dicatat pada pengujian ini antara lain tegangan generator induksi per fasa (V_g) dan putaran generator (n).

7.7.4 Hasil Pengujian

Hasil pengujian pengatur frekuensi dan tegangan yang telah dikoordinasikan untuk generator induksi kondisi tanpa beban dan berbeban ditunjukkan dalam Tabel 7.7.

Tabel 7.7 Hasil pengujian pengatur frekuensi dan tegangan.

Data ke	putaran, n (rpm)	V_g (volt)	pengatur frekuensi	pengatur tegangan	aksi mekanik pada <i>guide vane</i>	aksi mekanik pada tap kapasitor
1	1245	160	aktif	tidak aktif	memperlebar bukaan	tidak ada aksi
2	1459	220	aktif	tidak aktif	memperlebar bukaan	tidak ada aksi
3	1540	240	aktif	tidak aktif	memperkecil bukaan	tidak ada aksi
4	1456	195	aktif	tidak aktif	memperlebar bukaan	tidak ada aksi
5	1532	230	aktif	tidak aktif	memperkecil bukaan	tidak ada aksi
6	1685	280	aktif	tidak aktif	memperkecil bukaan	tidak ada aksi
7	1500	175	tidak aktif	aktif	tidak ada aksi	menambah kapasitor
8	1500	192	tidak aktif	aktif	tidak ada aksi	menambah kapasitor
9	1500	203	tidak aktif	tidak aktif	tidak ada aksi	tidak ada aksi
10	1503	220	tidak aktif	tidak aktif	tidak ada aksi	tidak ada aksi
11	1500	240	tidak aktif	aktif	tidak ada aksi	mengurangi kapasitor
12	1500	250	tidak aktif	aktif	tidak ada aksi	mengurangi kapasitor

Analisa pengujian pengatur frekuensi dan tegangan sama seperti pada pengujian pengatur frekuensi dan pengujian pengatur tegangan. Dari pengujian pengatur frekuensi dan tegangan ini menunjukkan bahwa koordinasi pengaturan dilakukan dengan pengatur frekuensi bekerja lebih dulu dibandingkan pengatur tegangan. Pengatur tegangan aktif saat pengatur frekuensi tidak aktif atau frekuensi sudah mencapai nilai nominal. Motor servo yang bekerja adalah yang terhubung dengan rangkaian pengatur yang aktif.

BAB VIII PENUTUP

8.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan pengujian dapat disimpulkan antara lain sebagai berikut :

1. Penambahan beban akan menyebabkan tegangan dan putaran generator mengalami penurunan. Tegangan keluaran dan putaran generator dijaga tetap konstan. Saat beban bertambah maka kapasitansi harus dinaikkan untuk menjaga agar frekuensi dan tegangan tetap berada pada kawasan yang diijinkan.
2. Putaran generator berbanding lurus dengan frekuensi yang dihasilkan generator. Tegangan generator dipengaruhi oleh frekuensi dan kapasitansi eksitasi. Pengaturan frekuensi dan tegangan dilakukan dengan menggunakan rangkaian elektronika yang mengendalikan dua motor servo, yaitu motor servo penggerak *guide vane* dan motor servo penggerak tap kapasitor.
3. Untuk kondisi frekuensi di luar kawasan yang diijinkan, maka pengatur frekuensi akan mengendalikan motor servo penggerak *guide vane*. Melalui pengendalian ini, *guide vane* akan mengatur debit air sedemikian hingga putaran turbin air dapat tetap konstan. Apabila frekuensi kurang dari nominal, maka pengatur frekuensi akan mengendalikan motor servo untuk memperlebar bukaan *guide vane* sehingga kapasitas air yang masuk ke turbin akan bertambah. Sedangkan apabila frekuensi melebihi nominal, maka pengatur frekuensi akan mengendalikan motor servo untuk memperkecil bukaan *guide vane*, sehingga kapasitas air yang masuk ke turbin dikurangi untuk mengurangi putaran turbin dan generator.
4. Untuk kondisi tegangan di luar kawasan yang diijinkan, maka pengatur tegangan akan mengendalikan motor servo penggerak tap kapasitor eksitasi. Apabila tegangan kurang dari nominal, maka pengatur tegangan mengendalikan motor servo untuk mengurangi tap kapasitor eksitasi yang terhubung sehingga tegangan akan menjadi nominal. Sedangkan apabila tegangan melebihi nominal, maka pengatur tegangan akan mengendalikan

motor servo untuk mengurangi jumlah tap kapasitor eksitasi sehingga tegangan akan menjadi nominal.

5. Pada koordinasi sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator induksi, yang bekerja lebih dulu adalah pengatur frekuensi. Pengatur tegangan akan bekerja saat frekuensi sudah mencapai nominal, sementara tegangan masih belum nominal.

8.2 Saran

Pada penelitian ini, perencanaan sistem pengaturan frekuensi dan tegangan. adalah pada hasil reaksi motor servo saat pengatur elektronika menerima masukan dari sensor frekuensi dan sensor tegangan. Perencanaan dan pengujian hanya dilakukan untuk mengetahui gerakan motor servo pengatur *guide vane* hipotetik dan gerakan motor servo pengatur tap kapasitor hipotetik. Pada penerapan di lapangan, perlu dilakukan perhitungan daya motor servo yang sesuai untuk menggerakkan *guide vane* dan sistem mekanik tap kapasitor eksitasi yang sebenarnya. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan hasil pengaturan yang lebih akurat pada generator induksi agar perencanaan dan perancangan yang dilakukan dapat diterapkan di lapangan.



DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, W.** 1988. *Mesin Penggerak Mula Turbin*. Bandung: ITB.
- Arismunandar, W.** 1991. *Pembangkitan dengan Tenaga Air*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Bhattacharya.** 1986. *Electrical Machines: Induction Machines, Synchronous Machines and Fractional Kilowatt Motors*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Boldea, Ion and Syed A. Nasar.** 2002. *The Induction Machines Handbook*. New York: CRS Press.
- Coughlin, Robert F.** 1992. *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linear*. Jakarta: Erlangga.
- Marsudi, Djiteng.** 2003. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: PT. Jalamas Berkatama.
- Fitzgerald, A.E.** 1992. *Electric Machinery 5th edition*. Singapore: Mc.Graw-Hill, Inc.
- Gönen, Tunan.** 1988. *Modern Power System Analysis*. Singapore: John Wiley&Sons
- Kadir, Abdul .** 1981. *Mesin Tak Serempak*. Jakarta: Penerbit Djambatan.
- Lister.** 1993. *Mesin dan Rangkaian Listrik edisi ke enam*. Jakarta: Erlangga
- McPherson, George.** 1981. *An Introduction to Electrical Machiens and Transformer 2nd Edition*. Singapore: John Wiley&Sons.
- McPherson, George and Robert D. Laramore.** 1990. *An Introduction to Electrical Machines and Transformer 2nd Edition*. Canada: John Willey and Sons, Inc.
- Mismail, Budiono.** 1989. *The Simulation of Induction Generators for Mycrohydro Systems*. New South Wales: School of Electrical Engineering and Computer Science University of New South Wales.
- Mismail, Budiono.** 1991. *Pelistrikan Desa di Indonesia*. Jakarta: Universitas Indonesia
- Mulyadi, Ahmad.** 1998. "Pengaturan Tegangan Pelayanan pada SUTM Panjang," *Energi & Listrik*. Vol VIII No. 3/4, Desember, 1998.

- Nasar, Syed. A.** 1995. *Electric Machines and Power Systems Volume I*. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- O'Kelly, Denis.** 1992. *Performance and Control of Electrical Machines*. London: Mc.Graw-Hill, Inc.
- Ogata.** 1996. *Teknik Kontrol Automatik*. Terjemahan Laksono Edi. Jakarta: Erlangga.
- Ravindranath, B.** 1987. *Power System Protection and Switchgear*. Singapore: John Wiley & Sons
- Santoso, Hari.** 1984. "Aplikasi Generator Induksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air Mikro". *Skripsi* tidak diterbitkan. Malang: Universitas Brawijaya
- Sen, P.C.** 1989. *Principles of Electric Machines and Power Electronic*. Ontario: John Wiley & Sons.
- Stevenson, William D.** 1983. *Element of Power System Analysis, 4th Edition*. Singapore: Mc.Graw-Hill, Inc.
- Subekti, Imam.** 1997. "Evaluasi Teknis PLTM Terpasang di Lingkungan PT. PLN (Persero)", *Energi & Listrik*. Vol VII No. 1/2/3, September, 1997.
- Suprpto.** 1984. "Alternatif Penggantian Governor dengan Sistem Beban Komplemen pada PLTM Maron Probolinggo". *Skripsi* tidak diterbitkan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Wardhani.** 1996. "Pengaruh Beban Industri Pada Mutu Tenaga Listrik," *Energi & Listrik*. Vol VI No. 2, Juni, 1996.
- Wildi, Theodore.** 2002. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. London: Prentice Hall.
- Wind, Danish.** 2003. *Asynchronous (Induction) Generators*. <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/async.htm>.

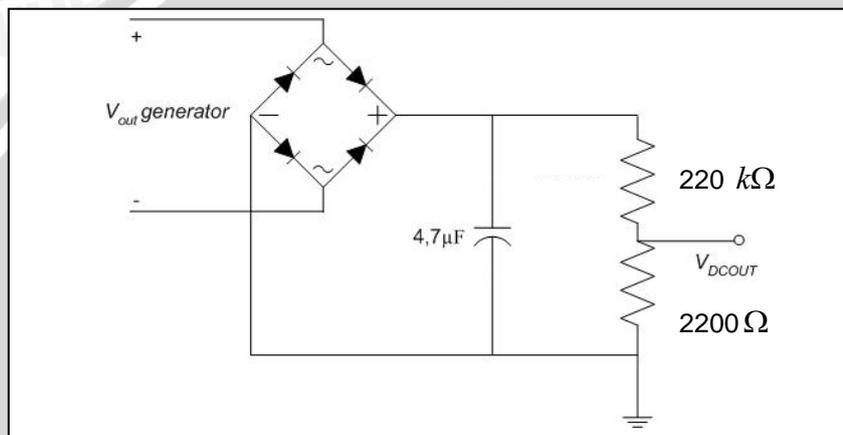
Lampiran 1

Komponen Rangkaian Pengatur Tegangan

1. Penyearah dan pembagi tegangan

a. Penyearah Tegangan

Rangkaian penyearah yang digunakan adalah penyearah gelombang penuh sistem jembatan dengan empat buah dioda. Hasil dari penyearahan tegangan AC menjadi DC masuk ke pembagi tegangan untuk mendapatkan tegangan DC yang kecil. Rangkaian penyearah dan pembagi tegangan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian penyearah dan pembagi tegangan

Besarnya tegangan masukan maksimum penyearah pada tegangan generator 220 V adalah

$$V_m = 220 \text{ volt}$$

Dioda yang dipakai adalah jenis dioda silikon sehingga $V_d = 0,7$ volt, sehingga besarnya tegangan puncak:

$$V_p = 220 - 1,4 = 218.6 \text{ volt}$$

Jika faktor riak yang diinginkan adalah 2%, maka tegangan riaknya adalah

$$V_{riak} = 2\% \times 218.6 = 4.372 \text{ volt}$$

Sehingga tegangan keluaran dc penyearah jembatan adalah:

$$V_{DC} = 218.6 - 4.372 = 214.228 \text{ volt}$$

Dengan frekuensi kerja generator sebesar 50 Hz, maka frekuensi keluaran hasil penyearahan adalah

$$f_{out} = 2 \times 50 = 100 \text{ Hz}$$

Periode keluarannya adalah

$$T = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ detik}$$

Konstanta waktu yang direncanakan sebesar 1000 kali periode keluaran dan resistor peluahan yang digunakan adalah 220 k Ω dan 2200 Ω , maka besarnya kapasitor yang dibutuhkan adalah

$$C = \frac{10}{222200} = 45 \mu\text{F}$$

Menyesuaikan dengan komponen di pasaran maka kapasitor yang digunakan adalah 47 μF .

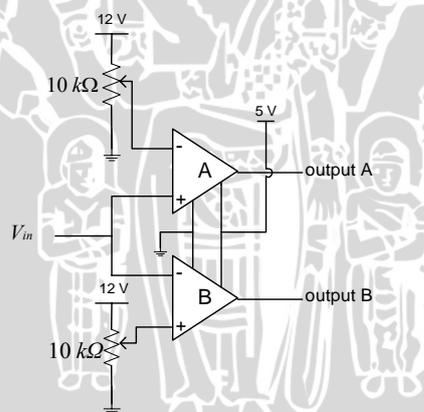
b. Pembagi Tegangan

Berdasarkan Gambar 1 dan melalui perhitungan, dengan adanya resistor pembagi tegangan maka V_{DC} keluaran penyearah jembatan adalah

$$V_{DC_{out}} = \frac{2200}{2200 + 100000} V_{DC} = \frac{2200}{2200 + 100000} 214,228 = 2,12 \text{ volt}$$

Tegangan sebesar 2.12 volt ini akan menjadi masukan rangkaian pembanding tegangan pada saat tegangan keluaran generator 220 volt.

2. Window Detector



Gambar 2. Rangkaian *window detector*

Rangkaian *window detector* pada Gambar 2 menggunakan LM 358. Batas atas tegangan referensi ditentukan dengan pengujian hasil rangkaian penyearah dan pembagi tegangan pada saat tegangan keluaran generator 231 volt. Sedangkan batas bawah ditentukan pada saat tegangan generator 198 volt. Batas atas tegangan referensi berada pada masukan *inverting* (-) A. Batas bawah tegangan referensi berada pada masukan *noninverting* (+) B. Dari hasil pengujian didapatkan:

Tabel 1. Pengujian pembagi tegangan

Vout generator (volt)	Vdc pembagi tegangan(volt)
220	1.95
230	2.04
198	1.78

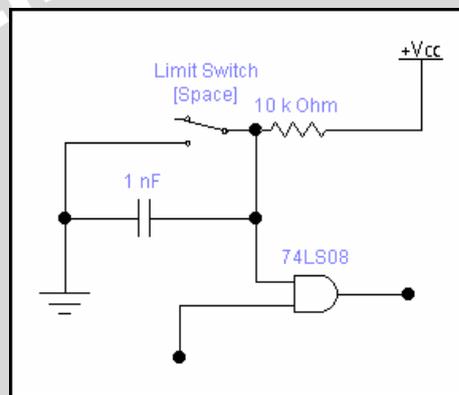
Batas atas = 2.04 volt (dc)

Batas bawah = 1.78 volt (dc)

Agar besarnya tegangan referensi dapat diatur, maka digunakan resistor variabel 10 k Ω .

3. Pembatas *Limit Switch*

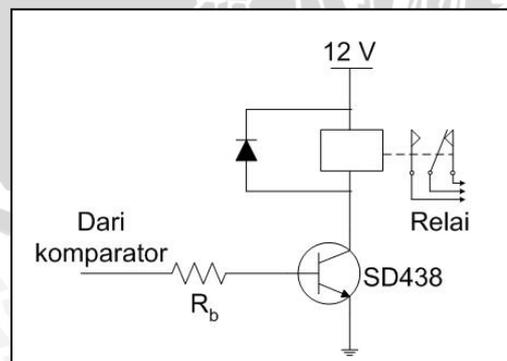
Rangkaian ini berfungsi untuk menghentikan kerja pengendali relay saat putaran motor servo sudah mencapai ujung awal maupun ujung akhir tap kapasitor.



Gambar 3. Rangkaian Limit Switch

4. Pengendali Relai

Rangkaian ini berfungsi untuk mengendalikan relai agar relai bekerja jika terjadi kenaikan tegangan yang melebihi batas. Rangkaian pengendali relai ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian pengendali relai

Pada rangkaian di atas digunakan transistor tipe NPN SD438, dengan nilai $\beta = 60$ (dari data sheet). Relai yang digunakan tipenya 4078-2C-12V. Jika relai membutuhkan arus sebesar 80 mA, besarnya resistansi basis R_B adalah

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{60} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0,7}{1,33 \cdot 10^{-3}} = 8496 \Omega$$

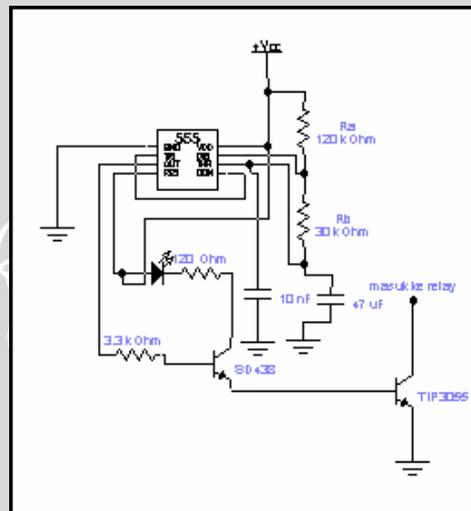
Menyesuaikan komponen yang ada di pasar maka R_B dipilih sebesar 8200 Ω .

5. Relay

Relai yang digunakan tipenya 4078-2C-12V. Kontak relai diatur pada posisi normal membuka (*normally open*).

6. Pewaktu (*timer*)

Rangkaian ini berfungsi untuk menghasilkan pulsa-pulsa tegangan yang akan digunakan untuk mengatur periode *on* dan *off* motor servo. Rangkaian pewaktu dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Timer (pewaktu)

Pewaktu dirancang bekerja dengan model astabil dengan periode 9 detik (4 detik *on* dan 5 detik *off*). Untuk mendapatkan hasil yang direncanakan, maka besarnya R_a dan R_b yang dipasang dapat dihitung:

$$t_{on} = 0,7 R_a C$$

$$R_a = \frac{t_{on}}{0,7 C} = \frac{4}{0,7 \times 47 \mu} = 121580,55 \Omega$$

$$t_{off} = 0,7 (R_a + R_b) C$$

$$R_b = \frac{t_{off}}{0,7 C} - R_a = \frac{5}{0,7 \times 47 \mu} - 121580,55 = 30395,13 \Omega$$

Menyesuaikan dengan komponen yang ada di pasaran maka $R_a = 120 \text{ k}\Omega$ dan $R_b = 30 \text{ k}\Omega$.

Lampiran 2

Komponen Rangkaian Pengatur Frekuensi

1. Alternator

Alternator yang digunakan tipenya 6PC-12V-6W. Alternator ini memiliki dua terminal tegangan keluaran yaitu 12V dan 2.5V. Terminal keluaran yang dipilih yaitu terminal 12 V. Hasil pengujian alternator ditunjukkan pada Tabel 7.2.

2. Penyearah dan pembagi tegangan

a. Penyearah tegangan

Rangkaian penyearah ini digunakan untuk menyearahkan tegangan keluaran dari alternator. Dengan cara yang sama pada rangkaian Gambar 1, didapatkan resistor pembagi tegangan $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ dan $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

b. Pembagi Tegangan

Berdasarkan Gambar , dengan adanya resistor pembagi tegangan maka V_{DC} keluaran penyearah jembatan adalah

$$V_{DC_{out}} = \frac{10000}{10000 + 10000} V_{DC} = \frac{1}{2} 10.488 = 5.244 \text{ volt}$$

Tegangan sebesar 5.244 volt ini akan menjadi masukan rangkaian pembanding tegangan pada saat tegangan keluaran alternator 12 volt.

3. Window Detector

Rangkaian seperti Gambar 2. Dari hasil pengujian pembagi tegangan, didapatkan:

Tabel 2. Tegangan keluaran pembagi tegangan pada pengatur frekuensi

Putaran (rpm)	Vout ac (volt)	Vout dc (volt)
1485	12.6	5.45
1500	12.8	5.56
1515	12.9	5.6

Batas atas = 5.6 volt

Batas bawah = 5.45 volt

4. Pengendali Relai

Pengendali relay sama seperti pada Gambar 4.

5. Relay

Relay yang digunakan sama seperti pada pengatur tegangan.

6. Pewaktu (*timer*)

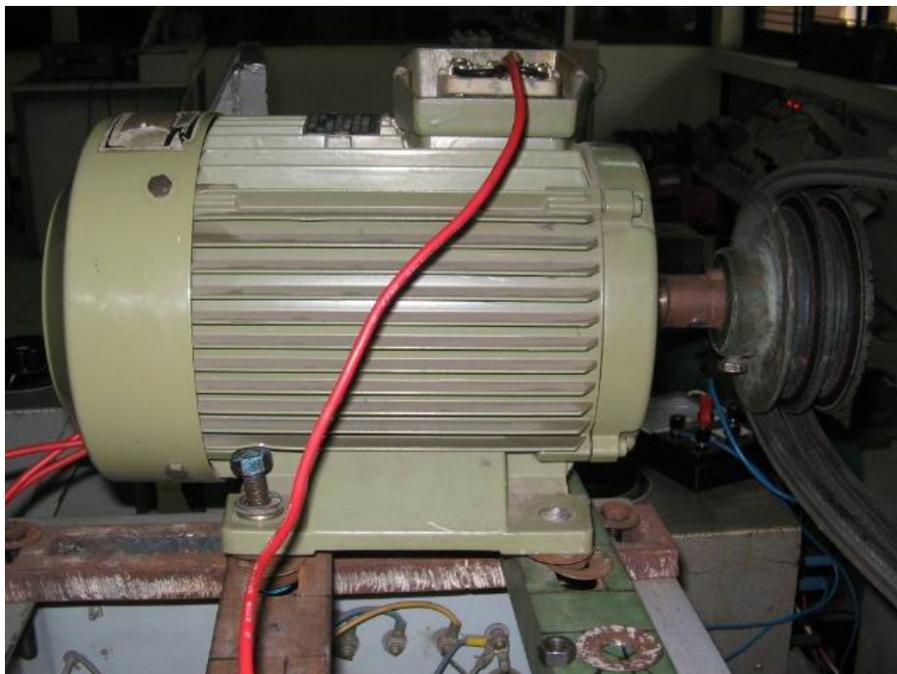
Rangkaian dan komponen yang digunakan sama dengan rangkaian pewaktu pada pengatur tegangan.

Lampiran 3

Merk dan tipe peralatan untuk pengujian

1. Generator Induksi fasa tiga, merek Stromberg; tipe HXUR 208A2 B3; daya 3 kW; tegangan Y/ Δ 380/220 Volt; frekuensi 50 Hz; arus nominal 7/12 Amp; putaran 1410 rpm; $\cos \varphi = 0,83$.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah, merek AEG; tipe Gf 130/170; daya 5 kW; 220 V; 22,7 A; 1500 rpm; Tegangan medan 220 V; Arus medan 0,71 A.
3. Resistor variabel merek AEG; 6 Ω ; 5 A.
4. Regulator fasa tiga yang dilengkapi dengan penyearah gelombang penuh fasa tiga, merek AEG; 220 V; 11,3 A.
5. Amperemeter DC, merek AEG; tipe CLU.
6. Amperemeter AC, merek AEG; tipe CLU.
7. Amperemeter, merek HB Elima; tipe ID 1000.
8. Voltmeter AC, merek Kaise; tipe SK-5000B.
9. Wattmeter fasa satu, merek Yokogawa; tipe JIS C1102.
10. Tachometer, merek Fuji Kogyo.
11. Alternator, merek Elephant; tipe 6PC-12V-6W.
12. Voltmeter digital, merek YFE; tipe YF-3502.

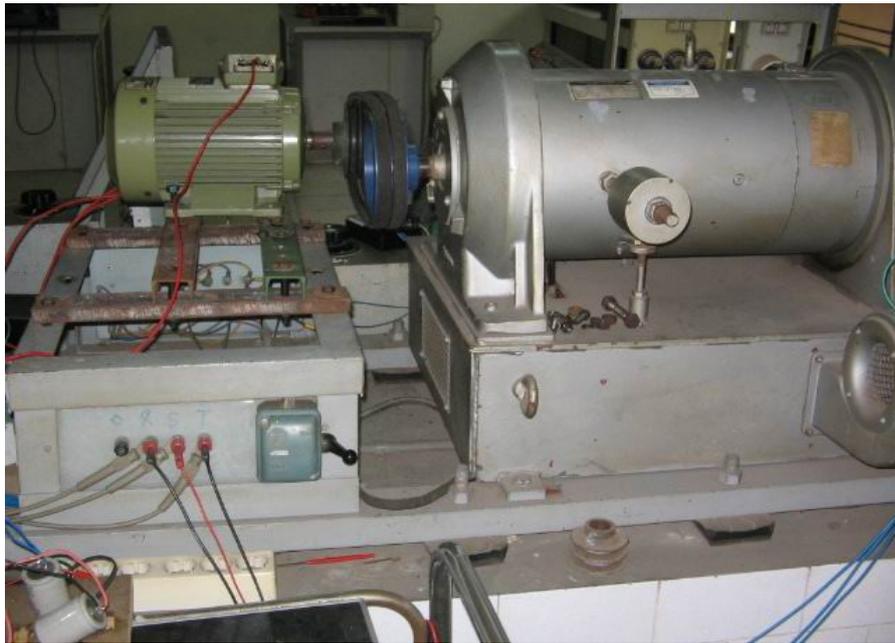
Lampiran 4
Foto objek pengujian



Motor induksi 3 kW



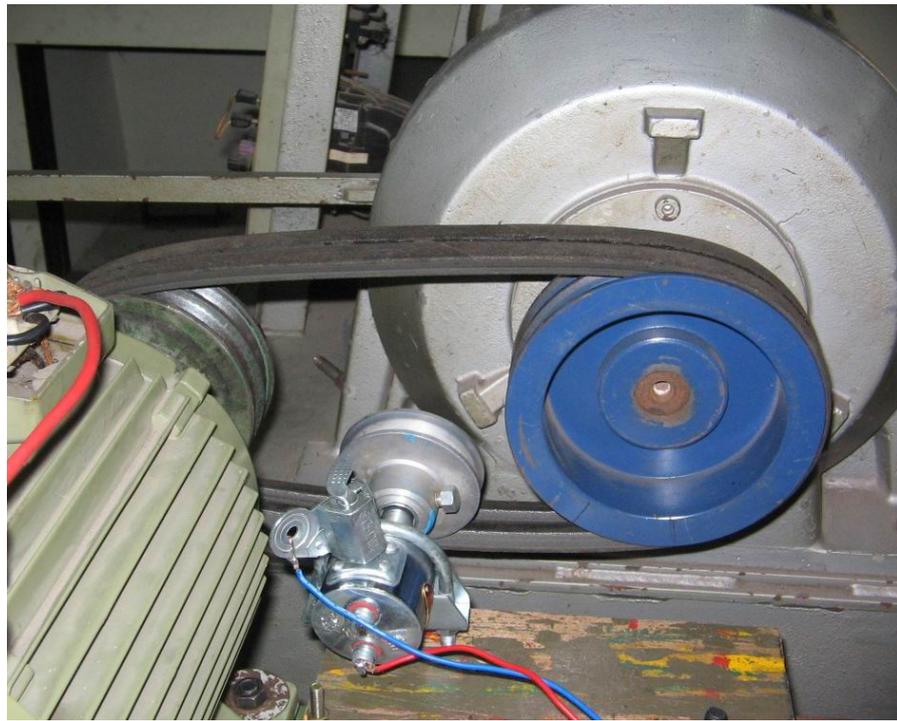
Motor dc penguat terpisah



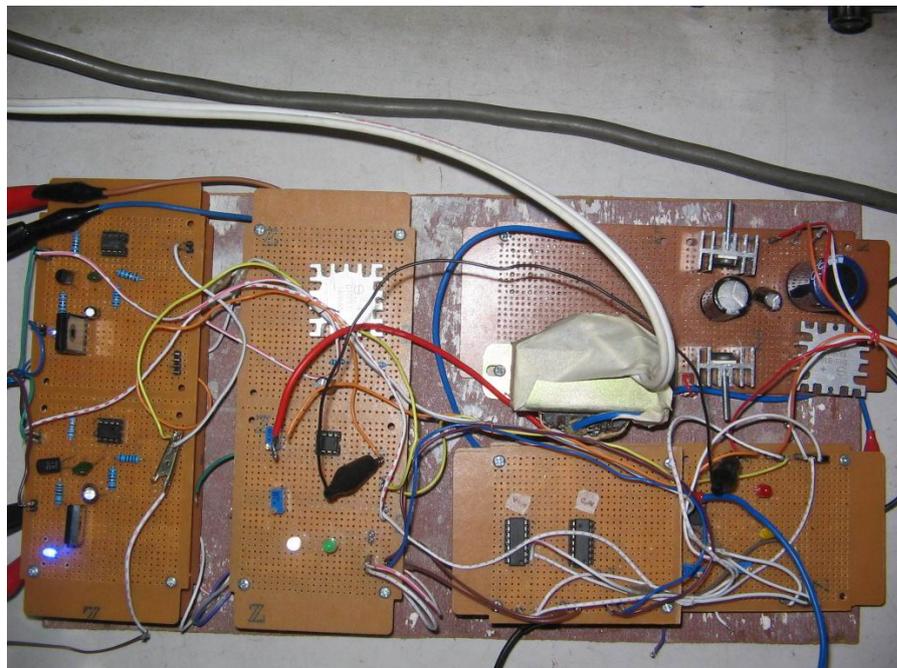
Motor induksi dikopel dengan motor dc penguat terpisah



Alternator atau PMG (*Permanent magnet Generator*)



Letak pulley alternator



Rangkaian elektronik pengatur frekuensi dan tegangan



Motor dc servo



Bangku kapasitor (*capasitor bank*)



Resistor variabel

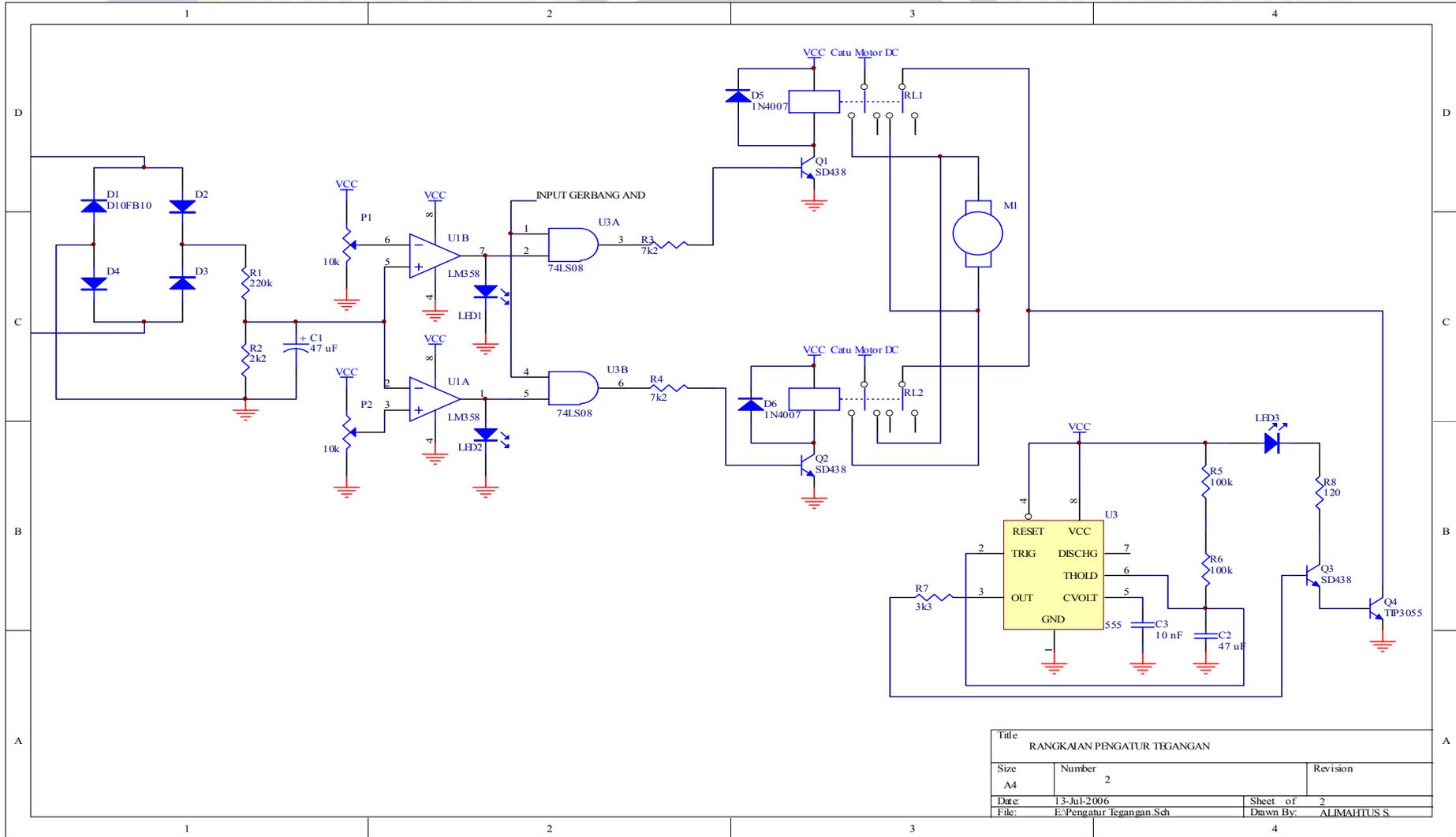


Lampiran 5
Rangkaian pengatur frekuensi



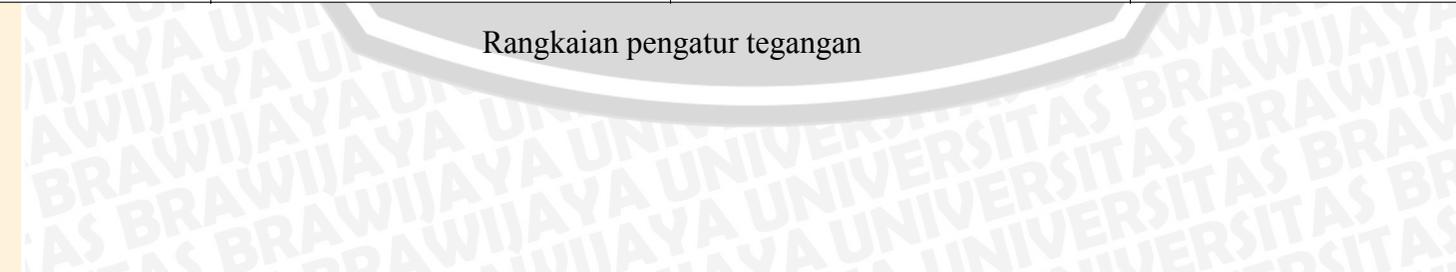
Lampiran 6
Rangkaian pengatur tegangan





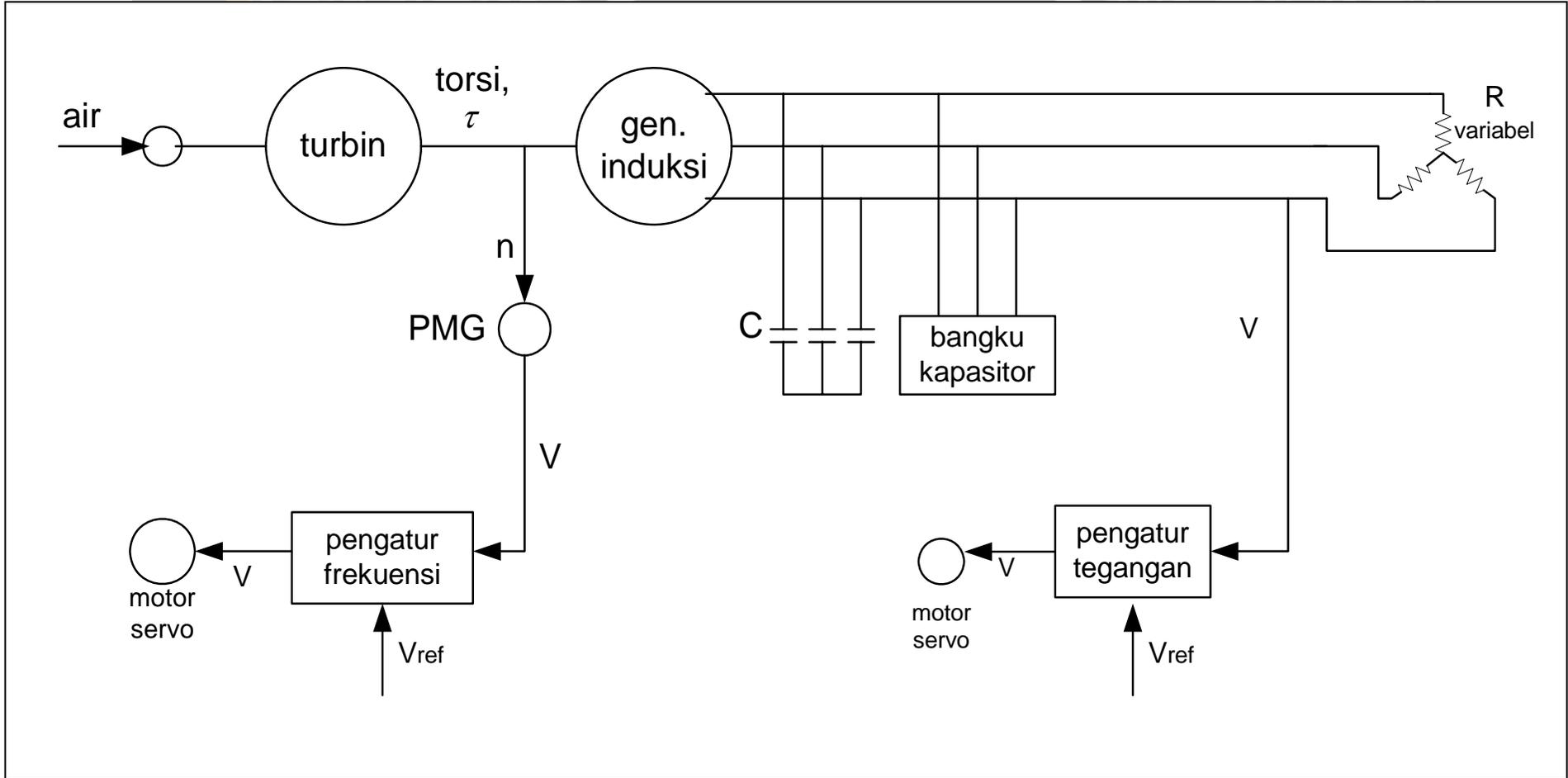
Title		
RANGKAIAN PENGATUR TEGANGAN		
Size	Number	Revision
A4	2	
Date	13-Jul-2006	Sheet of 2
File:	E:\Pengatur tegangan.Sch	Dawn By: ALMAHTUS S

Rangkaian pengatur tegangan



Lampiran 7
Rangkaian Pengujian Sistem Pengatur
Frekuensi dan Tegangan





Rangkaian pengujian alat sistem pengaturan frekuensi dan tegangan generator induksi

Lampiran 8
Data Sheet

